

650

Trenes eléctricos



Neagu Bratu Serban



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Trenes Eléctricos

Neagu/Bratu Serbán

#217786

C.B. 2893503



AZCAPOTZALCO

COSEI BIBLIOTECA

Trenes Eléctricos

2893503

Colección Ciencia y Tecnología

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

Rector General:

Dr. Gustavo A. Chapela Castañares

Secretario General:

Dr. Enrique Fernández Fassnacht

UNIDAD AZCAPOTZALCO

Rectora

Dra. Sylvia Ortega Salazar

Secretario de la Unidad:

Ing. Enrique Tenorio Guillén

Coordinadora de Extensión Universitaria

Antrop. Irma Juárez González

Jefa de la Sección Editorial

Mtra. Silvia Pappe

UAM
TF 855
B7.3

Portada: Salvador Guadarrama

Primera edición febrero 1991

ISBN 968-840-640-6

©Universidad Autónoma Metropolitana
Av. San Pablo No. 180
Azcapotzalco
México, 02200, D.F.

Impreso en México
Printed in Mexico

CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| CAPITULO I. Introducción | 9 |
| 1.1. Generalidades. | 9 |
| 1.2. Clasificación de sistemas de transporte. | 10 |
| 1.3. Las instalaciones principales de un ferrocarril eléctrico. | 10 |
| 1.4. Problemas que pone la electrificación. | 11 |
| 1.5. Sistemas motrices en el transporte eléctrico. El sistema de corriente trifásica, Sistema de corriente directa, Problema de la corrosión, Sistema de corriente alterna de baja frecuencia, Sistema de corriente mo- nofásica de frecuencia industrial. | 12 |
| 1.6. Generalidades sobre la locomotora eléctrica. | 20 |
| CAPITULO 2. Elementos de cálculo en la tracción ferrocarrilera | 23 |
| 2.1. Resistencias en la tracción. Resistencias al rodamiento, Resistencias en curvas, Resistencia en pendientes, Resis- tencia al arranque, Resistencia debido a las instalaciones eléctricas de los vagones, Resistencia debido a la inercia. | 23 |
| 2.2. Fuerza tractiva y peso adherente. Fuerza tractiva, peso adherente, coeficiente de adherencia, encabritamiento. | 28 |
| 2.3. Elementos mecánicos y eléctricos útiles en la tracción eléctrica. Velocidades, trabajo, potencia, energía, gráfi- cas de circulación. | 34 |
| 2.4. Ecuación de la marcha de un tren. | 36 |

| | |
|---|------------|
| CAPITULO 3. Locomotoras eléctricas de corriente directa | 37 |
| 3.1 Circuito principal de fuerza. | 37 |
| 3.2 El motor eléctrico de tracción de C.D. Condiciones de trabajo e indicadores característicos, tipos de motores de C.D., parámetros principales para la definición de un motor, límites de calentamiento para los motores de tracción, ecuaciones generales de la máquina de C.D., características funcionales del motor de C.D. tipo serie, características funcionales del motor de C.D. en derivación, características electromagnéticas universales de los motores de tracción, la operación del motor de tracción y las razones para que éste sea de tipo serie, datos constructivos usuales para los motores de tracción tipo serie. | 40 |
| 3.3. Regulación de velocidad. Regulación de velocidad con la tensión aplicada, regulación de velocidad con el flujo inductor, regulación reóstática de velocidad, el ensamble de las características de tracción, relación de transmisión de los engranes. | 72 |
| 3.4. Arranque y maniobras. El método grafoanalítico para el cálculo del reóstato, reóstato para maniobras, cálculo térmico del reóstato, el consumo de energía en el reóstato de arranque. | 90 |
| 3.5 Servicios auxiliares. Diagrama eléctrico de los servicios auxiliares, grupo motor-ventilador, grupo motor-compresor, grupo convertidor, acondicionamiento del aire. | 98 |
| 3.6 El regreso de la corriente de tracción. | 102 |
| 3.7 Aparatos eléctricos principales sobre la locomotora. El tomacorriente, circuitos de mando. | 104 |
| 3.8 El freno eléctrico. El freno eléctrico reostático con generador tipo serie, el freno eléctrico reostático con generador de excitación separada, el freno recuperativo. | 111 |
| CAPITULO 4. Locomotora monocontinua con rectificadores estáticos | 135 |
| 4.1. Circuito principal de fuerza. | 135 |
| 4.2 La rectificación y sus problemas. Características corriente - tensión, parámetros principales de un diodo, | |

| | |
|---|------------|
| ventajas de los rectificadores de silicio, la conexión serie y paralelo de los diodos, diagramas de conexión de los diodos, la conmutación de la corriente, la operación del rectificador alimentando un motor, cálculo del número de celdas para un rectificador en puente, protección de los rectificadores en puente. | 137 |
| 4.3 El motor de tracción de corriente ondulatoria. Método para eliminar el flujo pulsatorio, aislamientos para motores de corriente ondulatoria, comparación de los motores de corriente ondulatoria con los motores de C.D., características del motor de corriente ondulatoria. | 163 |
| 4.4 La regulación de velocidad. Graduador tipo BBC, Graduador tipo ASEA. | 167 |
| 4.5 El transformador. | 174 |
| 4.6 Los servicios auxiliares. Motores monofásicos 50/60 Hz, convertidor monofásico tipo ARNO, convertidor monofásico estático, convertidor monofásico tipo estado sólido, motores de corriente ondulatoria. | 179 |
| 4.7 El freno reostático. | 185 |
| CAPITULO 5. Locomotoras eléctricas con tiristores | 189 |
| 5.1. Circuito principal de fuerza | 189 |
| 5.2 La rectificación con tiristores | 189 |
| 5.3 Diagramas de conexión de los tiristores. Puente completamente tiristorizado, puente híbrido. | 192 |
| 5.4 El factor de potencia para una locomotora con tiristores. | 196 |
| 5.5 El freno recuperativo. | 203 |
| 5.6 Implicaciones del uso de los tiristores en las locomotoras eléctricas. | 208 |
| CAPITULO 6. Catenaria | 209 |
| 6.1 Elementos constructivos. Hilo de contacto, El cable mensajero, Los colgadores, Los aisladores, El sistema de ménsulas, La estructura soporte, El sistema de puesta a tierra. | 210 |
| 6.2 Cálculo mecánico de la catenaria. Fórmulas exactas, fórmulas parabólicas. | 212 |

| | |
|--|-----|
| 6.3 Otras consideraciones para el diseño mecánico de la catenaria. Depósitos de hielo, presión del viento, la ecuación de cambio de estado, compensador de tensión y flecha, el zig-zag de la catenaria, separación de apoyos en línea recta, separación de apoyos en curvas, catenaria compleja. | 215 |
| 6.4. Cálculo eléctrico de la catenaria. Cálculo por caída de voltaje, cálculo por pérdida de potencia. | 223 |

1. Introducción

1.1. Generalidades

Para ubicar los trenes eléctricos, empezamos a explicar los sistemas de transporte eléctricos, como medios de transporte de mercancía y personas, que utilizan la energía eléctrica, tomada de un sistema de generación, para transformarla en fuerza motriz.

Históricamente el descubrimiento de la electricidad y sus usos como fuerza motriz, coincide con la introducción de los primeros tranvías eléctricos.

En la segunda mitad del siglo pasado y el principio del presente, se introdujo el transporte eléctrico urbano, como sistema preponderante, en las grandes ciudades del mundo.

Considerando la situación presente sobre los energéticos, se puede anticipar que la forma generalizada de la energía en el futuro, será en forma de energía eléctrica.

Por esta y otras razones, hay que considerar los transportes de fuerza motriz eléctrica, como los transportes del futuro. Los sistemas de transportes eléctricos comprenden: trenes, tranvías, metros, trolebuses, bandas, escaleras, elevadores, etc.

Analizaremos solamente los sistemas movibles, o sea trenes, tranvías, metros y trolebuses.

Nuestro análisis propone una clasificación sumaria del punto de vista técnico-motriz, dejando a un lado el aspecto urbanístico social, el cual pertenece a otras especialidades de estudio.

En esencia, este trabajo está enfocado hacia la especialidad de ingeniería eléctrica, sobre los trenes eléctricos.

1.2 Clasificaciones de los sistemas de transportes eléctricos móviles¹

Los sistemas de transporte eléctricos móviles, se pueden clasificar conforme a varios criterios:

a. Considerando el uso:

- Urbanos: tranvías, trolebuses, metro
- Interurbanos: trenes, metro.

b. Considerando la vía:

- De vía ferrea: trenes, tranvías, metro
- De vía asfáltica: trolebuses.

c. Considerando el sistema de toma-corriente:

- Toma-corriente superior: trenes, tranvías, trolebuses.
- Toma-corriente lateral: metro.

d. Considerando la corriente de alimentación:

- Corriente directa (C.D.)
- Corriente alterna 16 2/3 Hz (25/Hz).
- Corriente alterna 50 Hz (60 Hz) trifásico.
- Corriente alterna 50 Hz (60Hz) monofásicos.

e. Considerando la carga (trenes)

- Trenes mercantiles.
- Trenes mixtos (con paradas seguidas y velocidad mediana).
- Trenes rápidos.
- Trenes expresos (regímenes de recorridos y velocidades distintas).

1.3 Las instalaciones principales de un ferrocarril eléctrico

En la figura 1.1, se muestran las partes principales de un ferrocarril eléctrico y estas son:

- Las instalaciones productoras de energía eléctrica (CE) (termoeléctricas, hidroeléctricas, etc).
- Líneas de transporte de energía eléctrica (LT).
- Acometidas de las líneas de transporte hacia las subestaciones específicas de los ferrocarriles y las subestaciones respectivas (ST).
- Catenaria (línea de contacto y sus accesorios) (C).
- Locomotora eléctrica, la cual transforma la energía eléctrica tomada de la catenaria, en energía mecánica, necesaria para mover el tren (LE).

¹ No se consideraron los sistemas autónomos, como son las locomotoras diesel eléctricas y los automóviles eléctricos de pilas.

- Los rieles, los cuales además de guiar el tren, sirven también como conductores eléctricos, para el regreso de la corriente (R).

Las primeras dos, la generación y el transporte de energía eléctrica, pertenecen al sistema nacional (CFE en México), mientras que las otras pertenecen al sistema de transporte como un consumidor más con respecto a los primeros.

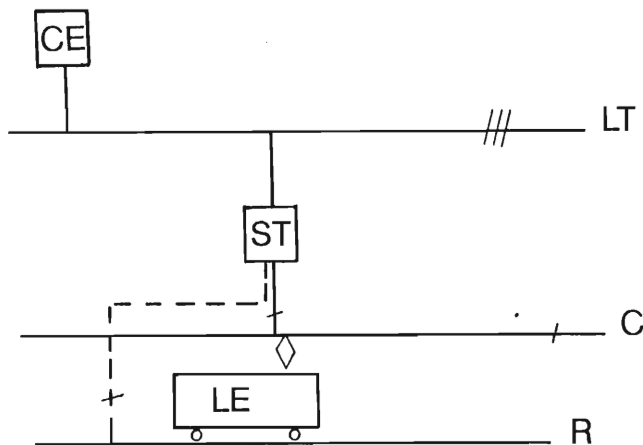


Fig. 1.1 Esquema de las instalaciones principales de un ferrocarril eléctrico.

1.4 Problemas que pone la electrificación

Para la electrificación de una línea férrea existente, se tiene que resolver, además de la catenaria en sí, los siguientes problemas:

- La sistematización de las estaciones, refortalecimiento de terracería, espacio para postas, etc.
- La reconstrucción de obras civiles, como puentes y túneles, los cuales no permiten el gálibo requerido.
- La reconstrucción de los cruces de las líneas de energía eléctrica con la vía.
- El aumento de los radios de la vía (donde están bajo las normas).
- La protección de las instalaciones de telecomunicación, control y señalización.

1.5 Sistemas motrices en el transporte eléctrico

Regresando a los criterios de clasificación de los sistemas de transporte eléctricos (1.2) y refiriéndonos solamente a los trenes, históricamente se pueden clasificar como sigue:

1.5.1 El sistema de corriente trifásico

Este sistema trabaja con motores trifásicos asíncronos, de número de polos variables.

Tiene dos troles, para dos fases y la tercera fase siendo la vía. Para el motor se puede escribir:

$$\cos\phi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (1.1)$$

y para mejorar el factor de potencia se recurrió a la frecuencia de 25 Hz.

Las deficiencias de este sistema son:

- Bajo factor de potencia.
- Dificultad en el control de la velocidad.
- Problemas serios con los dos tomacorrientes.

Este sistema se empleó en el norte de Italia y en Suiza, pero fue retirado.

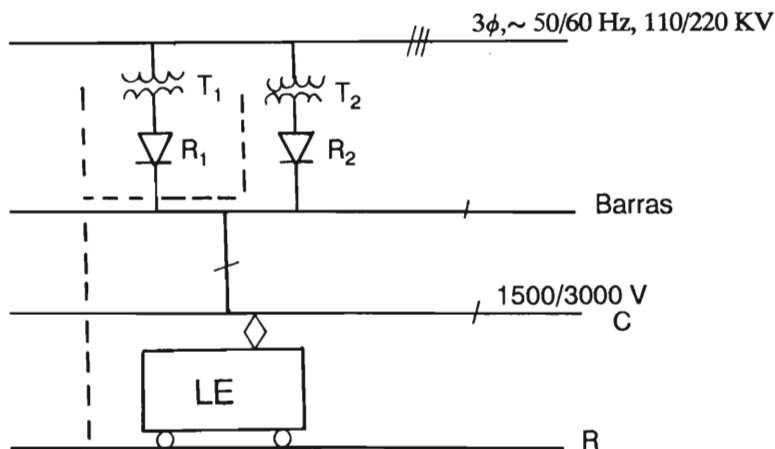


Fig. 1.2 Esquema de electrificación en corriente directa.

1.5.2. El sistema de corriente directa

En este sistema se supone que dentro de las subestaciones correspondientes a los puntos de alimentación a la catenaria, además de los transformadores reductores, se encuentra el equipo rectificador necesario. (Ver fig. 1.2).

En los sistemas más antiguos se utilizaba el grupo motor-generator, para la conversión y después siguieron los rectificadores a base de vapor de mercurio (el ignitrón); en la actualidad se utilizan los rectificadores tipo estado sólido, casi con exclusividad.

Las tensiones reglamentadas son de 0.75, 1.5 y 3 KV. La tensión de 0.75 KV se utiliza para tranvías y metros, 1.5 y 3 KV se utilizan para trenes.

Hasta la fecha la tensión máxima para los motores de C.D. en transportes es de 1.5 KV. Cuando se emplea el sistema de 3 KV se utilizan dos motores conectados en serie.

El límite de 3 KV está obligado también por el equipo auxiliar, debido a que los equipos de baja tensión (de alumbrado y de aire acondicionado del tren), los cuales enseriados, llegarían a niveles de tensión demasiado elevados con respecto a tierra.

1.5.2.1. Limitaciones del sistema de corriente directa

Los factores que limitan el empleo de este sistema son:

- Las subestaciones para la conversión son complejas y costosas.
- Las limitaciones de la tensión implican muchas subestaciones (cada 15-20 Km para 1.5 KV y cada 30-40 Km para 3KV)) y secciones grandes para la catenaria.
- Las corrientes de dispersión en la tierra producen la corrosión de las instalaciones adyacentes, (tuberías de agua, gas, productos derivados del petróleo, cables, puentes, etc).
- Utiliza un reóstato de arranque y regulación, lo cual implica pérdidas de energía. (Ver párrafo 3.4.4.).

1.5.2.2. El problema de la corrosión (Ver fig. 1.3)

La dispersión puede llegar a un 50% de la corriente de retorno. En los lugares donde dichas corrientes de dispersión se separan de las partes metálicas respectivas (zona anódica), los iones de metal van hacia la tierra, la destrucción del metal produciéndose rápidamente, debido a las altas intensidades de las corrientes.

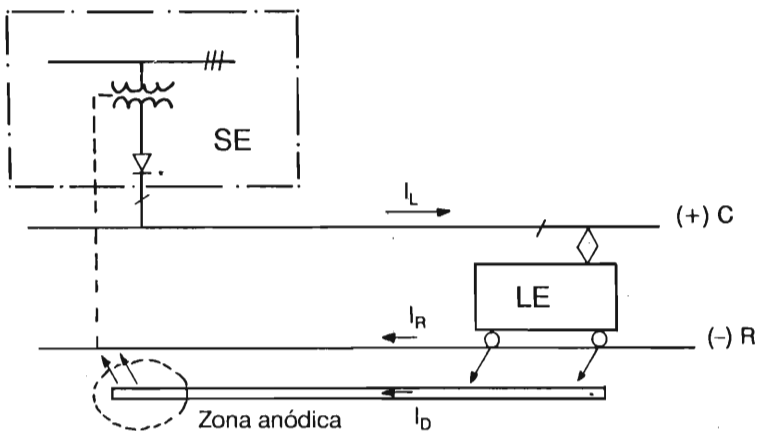


Fig. 1.3 Corrientes de dispersión y zona anódica.

En la instalación es muy difícil detectar estos lugares, debido a la diversidad local de la resistencia de la tierra (humedad, composición, etc).

Se consideran en peligro, todas las partes metálicas, que guarden paralelismo con las vías, en un radio de aproximadamente 100 metros. Como métodos para disminuir dicho efecto se citan:

- La interconexión de todas las vías en paralelo con cable de cobre electrolítico No. 2/0 AWG.
- Utilizar el dren eléctrico directo, que consiste en conectar dichas instalaciones directamente a la vía. (Ver fig. 1.4).

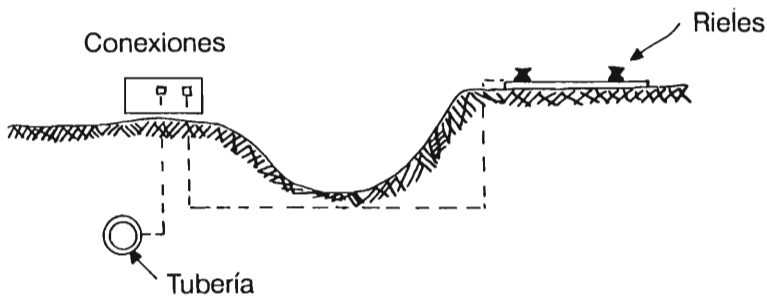


Fig. 1.4 Dren Eléctrico directo.

- Utilizar la protección catódica. Este procedimiento consta en aplicar un potencial eléctrico a las partes metálicas que se quieren proteger con respecto a la tierra, el cual evita que los electrones entren a las partes metálicas (los iones de metal vayan hacia la tierra). (Ver fig. 1.5).

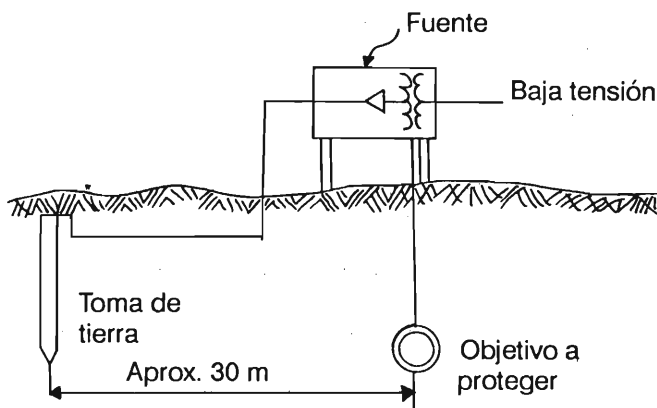


Fig. 1.5 Protección catódica.

Normalmente cuando se habla de la protección catódica, se compensa “el potencial de electrodo”, pero en el caso de trenes eléctricos, las corrientes son muy grandes, hecho que conduce a instalaciones complejas.

La protección catódica supone un gasto de energía y mantenimiento. Considero interesante notar una opinión de algunos técnicos responsables de PEMEX, en el sentido de que muchas veces se opta por proteger las tuberías con recubrimientos aislantes, debido a que las instalaciones de protección catódica quedan olvidadas, sin mantenimiento y pueden provocar fenómenos contraproducentes.

Hay que remarcar también, que este tipo de instalación implica un electrodo positivo “de consumo” (toma de tierra) el cual debe ser reemplazado a ciertos lapsos.

1.5.2.3. Ventajas del sistema de corriente directa

El sistema de corriente directa, aplicado a trenes eléctricos, tiene las siguientes ventajas:

- Las subestaciones con rectificadores operan con una eficiencia alta, para todas las cargas.
- Las subestaciones se prestan a automatizaciones.
- Este sistema se adapta a cualquier tipo de sistema local o nacional de electrificación.
- Los motores en C.D. sobre la locomotora ofrecen características ideales para el transporte.
- Las locomotoras alimentadas en C.D. se adaptan fácilmente al freno reostático o recuperativo.
- No producen disturbios en los sistemas energéticos respectivos (siendo un consumidor equilibrado).

1.5.3 Sistema de corriente monofásico de baja frecuencia (16 2/3 Hz) y tensión de 15 KV

Este sistema se introdujo en el transporte debido a que los motores de C.D. tipo serie en régimen de motor universal presentan graves problemas de conmutación a la frecuencia industrial. Utilizados a esta baja frecuencia, todavía dan resultados aceptables.

Desde el punto de vista alimentación, se conocen tres alternativas:

a). La producción y el transporte de energía eléctrica, directamente a la frecuencia respectiva (16 2/3 Hz).

Normalmente las centrales eléctricas nacionales están equipadas con algunos equipos a la frecuencia respectiva, destinados especialmente para el sistema de transporte.

Las subestaciones implican solamente el transformador, como equipo principal.

b). Puesto central para convertir la frecuencia. La energía eléctrica del sistema nacional es convertida con la ayuda de máquinas de tipo motor-generador a los parámetros requeridos para el sistema de transporte (16 2/3 Hz). Este puesto convertidor implica:

- Transformador reductor.
- Convertidor de frecuencia motor-generador.
- Transformador elevador.

c). Subestaciones para tracción con convertidores individuales. La energía eléctrica del sistema nacional alimenta dichas subestaciones como a cualquier consumidor y en las subestaciones respectivas se realiza la conversión de frecuencia con grupos motor-generador. Cada subestación tiene:

- Transformador reductor trifásico.
- Convertidor de frecuencia motor-generador.
- Transformador elevador.

1.5.3.1 Desventajas del sistema de baja frecuencia

Las desventajas del sistema de baja frecuencia son las siguientes:

- El equipo especializado, para convertir la energía a la frecuencia respectiva, es muy costoso.
- La baja eficiencia de los equipos de conversión, o sistema propio de generación y transporte a esta frecuencia.
- El motor de la locomotora (tipo serie), se enfrenta a problemas más difíciles de conmutación y es más complicado.

1.5.3.2 Ventajas que ofrece este sistema

Debido a que la catenaria se alimenta en AT, las subestaciones están retiradas (50-70 Km) y es más ligera.

- La locomotora está prevista con un transformador reductor, de donde se pueden sacar varias derivaciones de tensión, logrando así varias características del motor serie.
- Es una gran ventaja disponer de corriente alterna de B.T. sobre la locomotora, para servicios.

1.5.4 Sistema de corriente monofásica, de frecuencia industrial y A.T. (50/60 Hz, 25 KV)

Este sistema supone que las subestaciones propias del transporte, se alimentan del sistema eléctrico nacional, entre dos fases, a través de un transformador monofásico, el cual alimenta la catenaria por un lado y la vía por el otro. Sobre la locomotora se instala un transformador reductor, en cuyo secundario se alimenta el sistema rectificador y los servicios. Los motores principales son de C.D. El sistema rectificador en la actualidad es del tipo estado sólido.

1.5.4.1 Los principales problemas (deficiencias) de este sistema son:

- Desequilibrios provocados en el sistema de energías eléctrica (por ser un consumidor asimétrico).
 - La rectificación de la corriente sobre la locomotora, que en un principio era un verdadero problema.
- Desde 1955 estos problemas estuvieron superados.

1.5.4.2 Las grandes ventajas de este sistema son:

- La alimentación de las subestaciones pertenecientes al transporte se hace directamente del sistema eléctrico nacional.

- La subestación respectiva es muy sencilla, solamente el transformador reductor y su equipo anexo.
- Las subestaciones son muy retiradas (50-70 Km).
- La catenaria es muy ligera.
- Sobre la locomotora se dispone de corriente alterna a B.T.

En la figura 1.6 se presenta el esquema de principio de este sistema.

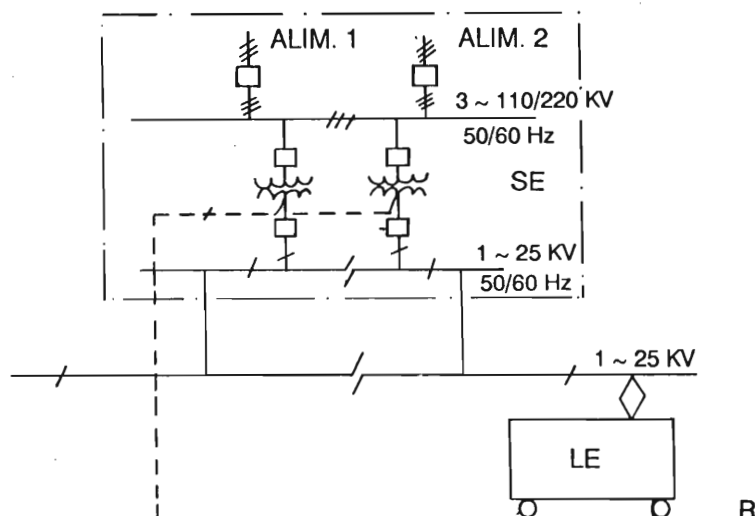


Fig. 1.6 Esquema de electrificación en corriente alterna y frecuencia industrial.

Para mejorar el equilibrio del sistema, se realizan intercambios de las fases.

Naturalmente el proveedor de energía eléctrica del sistema (CFE en México) debe autorizar la conexión del sistema de transporte y la realización del trabajo deberá hacerse en estrecha colaboración.

Visto desde el generador, el desequilibrio del sistema depende tanto del consumo del sistema de transporte, como del consumo de energía zonal, el cual se supone equilibrado. Se puede decir que la disimetría de corriente,

$$K_{di} = \frac{P_m}{P_m + P_s} \cdot 100(\%) \quad (1.2)$$

Donde:

K_{di} = Coeficiente de disimetría de corriente, en porcentaje.

P_m = Carga asimétrica, del sistema de transporte.

P_s = Carga simétrica zonal.
y la disimetría de tensión.

$$K_{dv} = \frac{P_m}{S_{cc}} \cdot 100(\%) \quad (1.3)$$

Donde:

K_{dv} = Coeficiente de disimetría de tensión.

S_{cc} = La capacidad de cortocircuito en el punto de acometida.

Según algunas normas se recomienda para K_{di} valores de 5 a 15% establecidas en el punto de generación más cercano y para K_{dv} , valores de 2 a 5% y se establece en las barras trifásicas del consumidor zonal más cercano.

Se puede concluir que la mayoría de la electrificación de los transportes después de los años 50, se realizan en el sistema de 25 KV, frecuencia industrial, nombrado algunas veces; *sistema monocontinuo*.

En la actualidad, la situación mundial del transporte por ferrocarriles se presenta aproximadamente así:

En Francia se tiene un 25% de sus vías electrificadas, pero esto maneja un 75% del transporte ferroviario.

De lo electrificado, la mitad está en C.D. 1500 V y la mitad en monocontinuo 50 Hz, 25 KV, con la perspectiva de desarrollar a éste último.

En Suecia, Alemania, Austria, Suiza, etc., se utiliza el sistema 16 2/3 Hz, 15 KV.

En URSS, Italia, Inglaterra, España, Checoslovaquia, etc., se utiliza el sistema de corriente directa.

En los países donde la electrificación empieza más tarde, la tendencia es hacia 25 KV, 50 Hz, como en Rumania, Yugoslavia, Australia, etc.

También en algunos países como Austria, Inglaterra, etc., que tenían el sistema de C.D., están cambiando al sistema 25 KV, 50 Hz.

De esta breve descripción, resulta claramente la tendencia mundial hacia la tensión de 25 y 50 KV y frecuencia industrial.

1.6 Generalidades sobre la locomotora eléctrica

El vehículo ferrocarrilero capaz de desarrollar una fuerza motriz, que transmitida a un grupo de vagones, los puede transportar, sobre vías, se llama locomotora.

En el caso de que la energía necesaria sea tomada de un hilo de contacto a través de un trole, se llama locomotora eléctrica.

Existen también trenes automotores, en los cuales sobre el mismo chasis se instalan los motores y pueden cargar pasajeros e inclusive se le pueden anexas vagones. Estos son trenes especiales. Las locomotoras eléctricas se pueden clasificar conforme a varios criterios:

a. Considerando la operación:

- Para trenes de viajeros (con regímenes distintos de velocidad y carga).

- Para trenes mercantiles.

- Para maniobras.

De estas clasificaciones resultan regímenes muy distintos de operación.

b. Considerando la manera de accionar los ejes:

- Con accionamiento en grupo (un motor acciona varios ejes)

- Con accionamiento individual (cada motor acciona un solo eje).

c. Considerando la disposición de los ejes:

- Locomotora con adhesión total en la cual todos los ejes son motrices.

- Locomotora con adhesión parcial, la cual tiene algún eje libre (sistemas antiguos).

Cualquier locomotora se puede considerar formada de dos partes: Una parte mecánica más o menos, comunes a todas las locomotoras y una parte motriz, la cual caracteriza cada tipo de locomotora en particular.

Del punto de vista mecánico, la locomotora puede considerarse como un ensamble de elementos, conectados elásticamente o rígidamente entre sí. (Ver fig. 1.7).

Distinguimos tres partes importantes:

- La parte rodante, compuesta por eje y ruedas, así como cajas de muñones y engranaje (R). Esta parte no está suspendida, cuyos impactos sobre la vía son decisivos.

- El bogie (carretón) (B), el cual se respalda sobre la parte rodante a través de una suspensión primaria Sp.

- La caja (C), la cual a su turno se respalda sobre los bogies a través de la suspensión secundaria Ss.

Las suspensiones S_p y S_s , representan las conexiones entre los respectivos elementos sobre la vertical.

Las conexiones longitudinales y transversales se realizan, sea por medios elásticos, sea por medios rígidos.

El número de bogies y el número de ejes para cada bogie puede variar.

En el lenguaje internacional, esta variedad constructiva se clasifica simbólicamente.

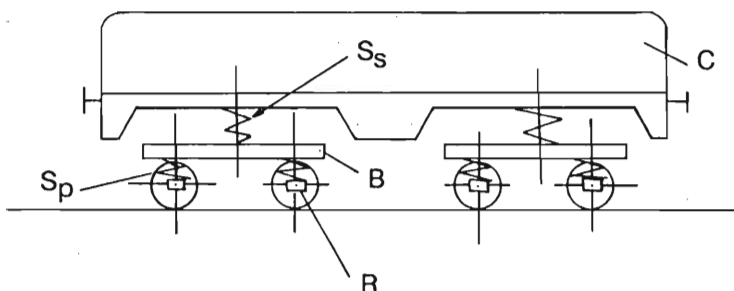


Fig. 1.7 Esquema mecánico de una locomotora.

Al principio se utilizaron letras alfabéticas para los ejes motores y números para los ejes libres.

Si cada eje está provisto de accionamiento individual, se le asigna a la letra mayúscula, el índice cero.

En la actualidad, ya no se usan ejes libres y casi siempre se realiza el accionamiento individual de los ejes.

Puede haber, también, locomotoras compuestas.

Para entender esta simbología, se muestran los siguientes ejemplos. (Ver fig. 1.8).

B - B = Locomotora con dos bogies, cada bogie tiene dos ejes, con accionamiento individual.

B - B - B = Idem, pero de tres bogies.

C - C = Locomotora de dos bogies de tres ejes c/u.

B - B + B - B = Locomotora compuesta de dos locomotoras del primer ejemplo.

Las letras significan:

A = 1 eje, B = 2 ejes, C = 3 ejes, D = 4 ejes.

Algunas administraciones de ferrocarriles pueden asignar otras nomenclaturas, las cuales tengan una simbología aparte.

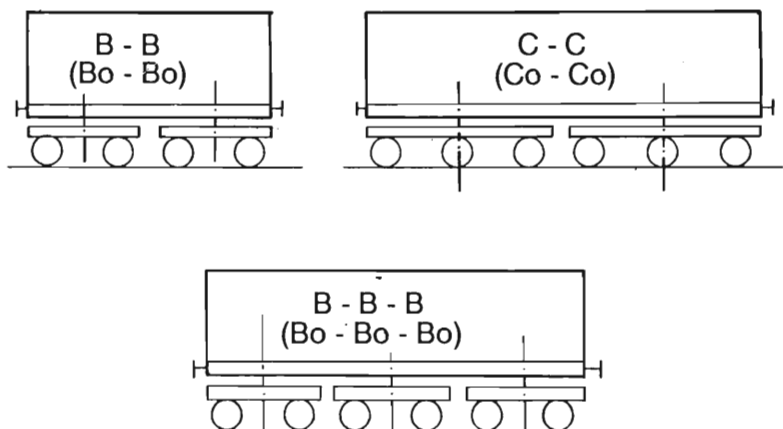


Fig. 1.8 Ejemplos de Locomotoras eléctricas.

2. Elementos de cálculo en la tracción ferroviaria

2.1. Resistencias en la tracción

Cuando el tren se desplaza sobre los rieles, aparecen algunas resistencias (mecánicas), las cuales se oponen al movimiento.

El determinar estas resistencias es importante para así poder especificar la fuerza motriz, capaz de vencerlos, permitiendo el avance del tren.

Debido a que todos los libros clásicos de ferrocarriles expresan la fuerza tractiva en Kgf., que es un sistema clásico de expresión para la fuerza, en este libro guardaremos esta misma expresión, haciendo la mención que la parte mecánica no es el objetivo principal que nos proponemos tratar.

Las resistencias en la tracción se expresan en unidades de fuerza por tonelada de masa.

Recordamos que la transferencia entre Kgf (unidad antigua) y N (Newton, unidad de fuerza del sistema SI actualizada) se realiza con la relación:

$$1Kgf = 9.81N \quad (2.1)$$

Estas resistencias se pueden agrupar en varias categorías como sigue:

2.1.1 Resistencias al rodamiento

Estas resistencias comprenden:

- Resistencias debidas a la fricción en los cojinetes.
- Resistencias debidas a los dispositivos de tracción, de suspensión y de golpeo, las cuales se deben a los movimientos parásitos del vehículo.

Estos movimientos son oscilaciones longitudinales, transversales y serpentinales.

- Resistencias debidas a las deformaciones producidas por el golpeo, tanto en la parte rodante como en los rieles.
- Resistencias debidas a la fricción con el aire, con o sin viento, en el aire libre o en túneles.

Todas estas resistencias dependen de un sinnúmero de factores, como son: velocidad, construcción, condiciones atmosféricas, peso, lubricantes, mantenimiento de la vía y del material rodante, el largo del tramo y el peso de la vía, procedimiento de carga de los vagones, etc.

Para simplificar el cálculo de la resistencia al rodamiento es conveniente usar fórmulas empíricas, en función solamente de la velocidad.

Estas fórmulas son del tipo general;

$$R = a + b V + c A V^2 \quad (2.2)$$

donde a, b, c son constantes; A es el área transversal del modelo y V es la velocidad.

Los coeficientes a, b y c toman distintos valores para varios autores, dependiendo del equipo utilizado y de la carga.

Algunas de estas fórmulas son:

- Fórmula de Frank y Strahl

$$r_r = 2.5 + \frac{1}{a} \left(\frac{V}{10} \right)^2 \quad (2.3)$$

Donde:

r_r = resistencia en kgf/t.

V = velocidad en km/h.

a = Coeficiente (de acuerdo a las características del tren).

a = 40 para trenes viajeros de gran velocidad.

a = 30 para los mismos a velocidad mediana.

a = 25 para trenes mercantiles de gran velocidad.

a = 20 para los mismos de velocidad mediana.

a = 10 para vagones mercantiles vacíos.

- Fórmula Barbieri:

$$r_r = 1.6 + 0.023 V + 0.00046V^2 \quad (2.4)$$

- Fórmula Davis (aplicada en México).

$$r_r = 0.65 + \frac{13.16}{W} + 0.0024 V + \frac{0.0046AV^2}{WN} \quad (2.5)$$

donde además de las notaciones anteriores intervienen:

W = peso por eje, en toneladas.

N = número de ejes.

Existen otras fórmulas en la literatura de especialidad, aplicadas por varias compañías ferrocarrileras.

En el caso de la locomotora, su resistencia al rodamiento es mayor, por considerar mayores fricciones de los equipos motrices (engranes, cojinetes, baleros, etc).

Los ferrocarriles de Austria utilizan, para la locomotora, la fórmula:

$$r_1 = 1.8 + 0.0012V^2 \quad (2.6)$$

pero en general, el fabricante de la locomotora proporciona, para cada caso, esta relación.

2.1.2 Resistencias en curvas

El vehículo ferroviario tiene que vencer en las curvas, además de las resistencias al rodamiento ya vistas, otras resistencias, debido a:

- Las ruedas tienen la tendencia de ir sobre la tangente, originando fricciones suplementarias sobre el riel exterior.

- En la entrada y salida de las curvas se produce una fricción de la cajas de los vehículos sobre los bogies.

- El radio de curvatura para la vía exterior es mayor que para la vía interior y por lo tanto, la rueda exterior tiene que recorrer un camino más largo, provocándose así una fricción adicional entre las ruedas y la vía.

Para considerar en cálculos estas resistencias, se usan fórmulas empíricas. Una de estas es la fórmula de Rockl. como sigue:

$$r_c = \frac{500}{\rho - 30} \text{ para } \rho < 250m$$

$$r_c = \frac{530}{\rho - 35} \text{ para } 250 < \rho < 350m \quad (2.7)$$

$$r_c = \frac{650}{\rho - 55} \text{ para } \rho > 350m$$

En donde:

r_c = resistencia específica debido a la curva en kgf/t.

ρ = radio de la curva en m.

Debemos notar que existen otras fórmulas de cálculo para esta resistencia.

2.1.3 Resistencia en pendientes

Normalmente, los declives se dan en tanto por mil (0/00) y se anota con i (mm/m).

Si anotamos la resistencia en la pendiente r_p en kgf/t, resulta que:

$$r_p = i \text{ (kgf/t)} \quad (2.8)$$

haciendo notar que r_p está dado en kgf/t é i en mm/m. Naturalmente dicha resistencia se toma con signo contrario, cuando el tren va de bajada.

2.1.4 Resistencia al arranque

En el caso de que el tren esté parado de 20 a 30 minutos, desaparece la película de aceite, que normalmente existe en las chumaceras, por lo que los ejes se “pegan”. También se puede decir que las ruedas se “pegan” en la vía. Si la locomotora tiene que despegar todo el tren, esta resistencia puede ser considerable. Normalmente el operador frena de tal manera que los vagones queden más cercanos (que los amarres no queden extendidos) de tal manera que el arranque se haga de uno en uno.

Algunos autores dan relaciones empíricas para estas resistencias. Aquí solamente las mencionamos como fenómeno físico.

2.1.5 Resistencia debido a las instalaciones eléctricas de los vagones

En algunos tipos de vagones de viajeros se dispone de un generador eléctrico, provisto para el alumbrado de vagón y para el acondicionamiento del aire.

En estos casos hay manera de calcular dicha potencia, como una resistencia suplementaria, con la cual debe cargar la locomotora.

2.1.6 Resistencia debido a la inercia

De conformidad con la ley de Newton, para acelerar una masa se necesita una fuerza.

Si se trata de un vehículo de peso p y masa m , que tiene que vencer varias otras resistencias (ya numeradas anteriormente), cuyo valor será R , para ser desplazado con una aceleración a , deberá aplicarse la fuerza F , conforme a la relación:

$$F = R + m.a \quad (2.9)$$

El segundo término, se puede considerar como una resistencia más.

$$R_a = m.a$$

Si consideramos esta resistencia a la aceleración, como específica por tonelada de peso, podemos decir que:

$$r_a = \frac{R_a}{p}; m = \frac{p}{g}$$
$$r_a = \frac{m.a}{p} = \frac{\frac{p}{g}.a}{p} = \frac{a}{g}$$

Si se aproxima $g=10 \text{ (m/s)}$, resulta:

$$r_a = 100.a(\text{kgf/t}) \quad (2.10)$$

Donde:

r_a = resistencia a la aceleración en kgf/t.

p = peso en toneladas.

a = aceleración del tren, en m/s^2 .

$g = 9.81$ aprox. 10, es la aceleración gravitacional, en m/s^2 .

El valor de a tiene, por lo general, $0.13 \dots 0.4 m/s^2$.

Para el cálculo del arranque, coeficientes de la calidad del arranque (ver y párrafo 3.4) y tiempos de arranque, así como para el cálculo del frenado, se emplean relaciones semiempíricas, a partir de la relación: [7]:

$$F \cdot \ell = 4.25(V_2^2 - V_1^2) \quad (2.11)$$

respectivamente [7]:

$$t = \frac{27(V_2^2 - V_1^2)}{F} \quad (2.12)$$

Donde:

F = es la fuerza tractiva (arranque o frenado), en kgf

ℓ = es la distancia, en metros.

V_1, V_2 = es la velocidad inicial, respectivamente final, en Km/h.

t = es el tiempo de cambio de velocidad de V_2 a V_1 , en segundos.

(Ver Togno, cap. III).

2.2 Fuerza tractiva y peso adherente

2.2.1 Fuerza tractiva

Hemos visto anteriormente que la resistencia total que se opone al movimiento de todos los vagones de un tren, se puede escribir como:

$$R = r \cdot p(kgf) \quad (2.13)$$

Donde:

r = resistencia específica total (kgf/t).

p = peso de todos los vagones. (t).

De aquí que una locomotora debe desarrollar a su gancho de tracción, una fuerza igual, para que el tren circule a una velocidad determinada, con la cual se calculó R .

2.2.2. *Peso adherente*

Por definición, el peso adherente de una locomotora, es parte de su peso total, que carga sobre sus ejes motrices, en la suposición de que existieran ejes libres.

Para establecer el peso adherente para un eje motriz, se divide el peso total de la locomotora por el número de ejes de la misma.

En reposo el equilibrio de la rueda se establece como:

$$R = P$$

O sea, el peso es igual con la reacción. (Ver fig. 2.1).

Si el motor desarrolla un par M , el cual se transmite a los engranes z_1 y z_2 , aparece la fuerza tangencial T .

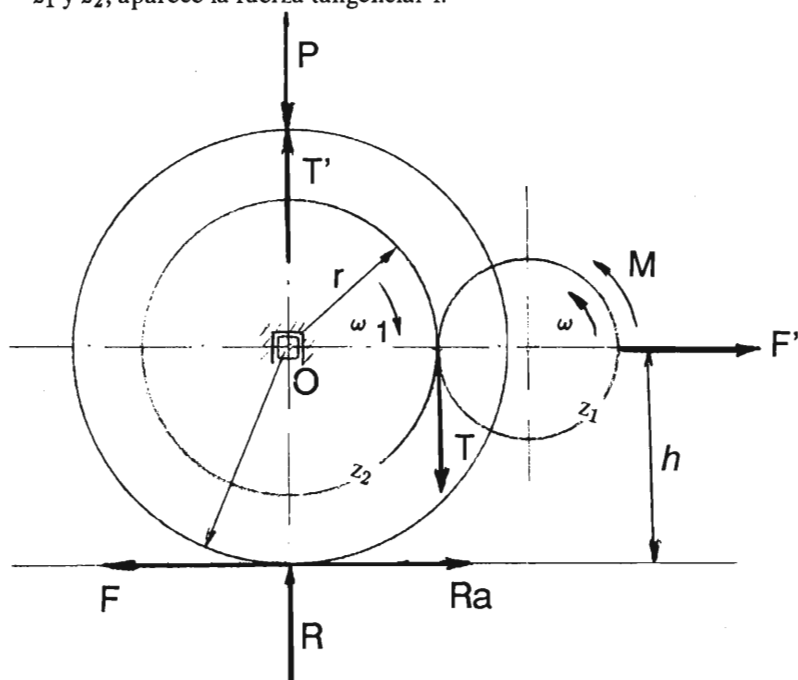


Fig. 2.1 Diagrama de fuerzas y pares sobre el eje motriz.

Debido a esta fuerza, en el eje 0 aparece la fuerza T' igual a T y de sentido contrario. El par producido de estas fuerzas será:

$$M = T'.r \quad (2.14)$$

Este par es transmitido del engrane z_1 al eje principal, y considerándolo a la periferia de la rueda, será:

$$M = F.r' \quad (2.15)$$

Para equilibrar el sistema, esta fuerza F , transmitida a la vía produce una fuerza paralela y de sentido contrario F' , que a la postre, es la fuerza que el eje motriz aporta al gancho de la locomotora.

Pero hay que considerar la reacción R_a , sobre la vía, igual y de sentido contrario con F .

La fuerza F' se produce como efecto de la adherencia de la rueda sobre la vía. Esta fuerza está limitada por el peso adherente y por el coeficiente de fricción, de conformidad con la relación:

$$F'max = F_a = 1000.\phi.Pa(kgf) \quad (2.16)$$

en donde:

Pa = peso adherente, en toneladas

ϕ = coeficiente de adherencia entre rueda y vía, sin dimensiones.

El coeficiente 1000 interviene debido a que la fuerza se expresa en kgf y el peso adherente en toneladas.

2.2.3 Coeficiente de adherencia

El coeficiente de adherencia ϕ depende de varios factores, de los cuales una parte se deben al estado de la vía y de las ruedas y la otra parte se deben al estado de la locomotora en general.

El estado de la vía depende principalmente del tiempo y especialmente si la vía está seca o mojada. (Ver. 2.2.4).

Para poder transmitir el esfuerzo de tracción a la vía, se debe permitir un ligero deslizamiento.

El deslizamiento de las ruedas se define como la diferencia entre la velocidad radial de la rueda y la velocidad del vehículo.

Se definen tres zonas en la curva que relaciona el esfuerzo de la tracción y el deslizamiento. (Ver fig. 2.2).

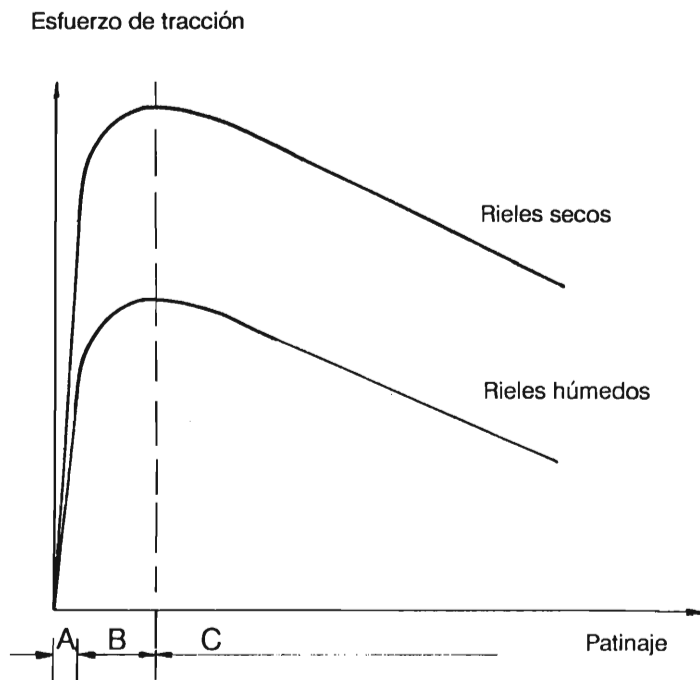


Fig. 2.2 Característica del esfuerzo de tracción en función del patinaje.

El deslizamiento en la zona A, es muy pequeño y permite transmitir esfuerzos considerables a la vía.

Se puede hablar de un microdeslizamiento o en lenguaje internacional “creep”, (otros autores lo nombran falso deslizamiento).

En la zona B el deslizamiento es mucho mayor. El esfuerzo de tracción a la vía aumenta hasta un pico, al final de la zona B y después cae a valores menores (ver curva) en la zona C.

En la zona B y C se habla de un macrodeslizamiento o “spin”, que si, es el patinaje.

Las zonas A y B, hasta el punto del esfuerzo máximo, representan rangos de trabajo estable, mientras que después de este punto, en la zona C, representa un rango inestable.

Si este deslizamiento (patinaje) no es controlado, se puede llegar a la destrucción del motor (especialmente para un motor tipo serie).

2.2.4 Valores prácticos para el coeficiente de adherencia

Como vimos anteriormente, el valor del coeficiente de adherencia depende de muchos factores y no se puede determinar analíticamente. Pero si, es absolutamente necesario conocer su valor para la práctica de diseño y de operación.

Existen fórmulas empíricas, así como curvas experimentales, para varios equipos y varias condiciones de trabajo.

Como los valores del coeficiente de adherencia están dispersos, en función de velocidad, se puede hablar de un dominio en el interior del cual se encuentran los valores del mismo.

Podemos decir que dicho dominio está marginado de dos envolventes y que está caracterizado por una curva promedio.

En la fig. 2.3, se muestran los valores prácticos experimentales construidos en base a los levantamientos realizados por Curtius y Kniffler. A la curva promedio le corresponde la relación

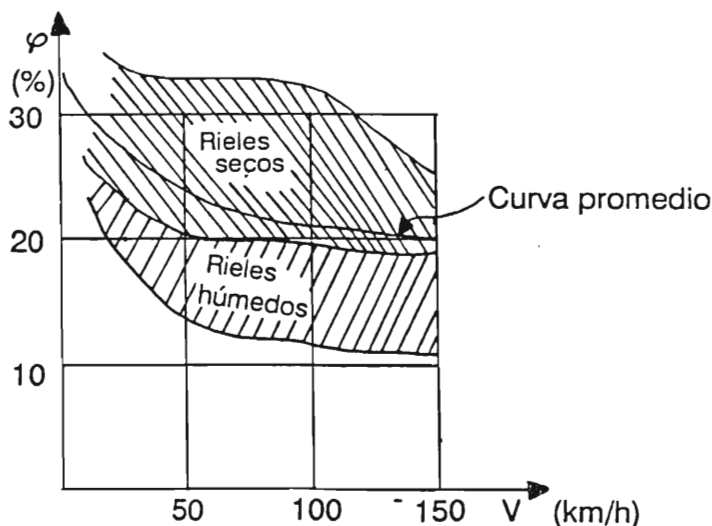


Fig. 2.3 Valores experimentales del coeficiente de adherencia.

$$\phi = \phi_0 \frac{8 + 0.1V}{8 + 0.2V} \quad (2.17)$$

(donde se toma $\phi_0 = 0.33$)

Estos experimentos se realizaron con una locomotora de corriente alterna monofásica 16 2/3 Hz., 15 KV, del tipo 1-Do-1.

Naturalmente, otros autores, sobre otro equipo probado, recomiendan otros valores, para ϕ , pero éste nunca es mayor de 0.5.

El coeficiente de adhesión sufre una disminución aproximadamente de un 10% en pendientes, curvas y túneles.

Algunas locomotoras disponen de unos dispositivos para soplar arena en el punto de contacto rueda-vía, para así mejorar la adherencia en condiciones críticas. Otras locomotoras eléctricas disponen de dispositivos electrónicos para detectar el patinaje y corregir la fuerza de tracción, actuando sobre los devanados del motor.

La compañía ASEA (Suecia) dispone de un equipo electrónico que puede detectar el patinaje desde su inicio. Este detector basa su principio en las vibraciones mecánicas naturales del conjunto ruedas-eje.

La señal de cada par de ruedas, filtrada, se centraliza para todos los pares de ruedas y se compara. Si un par de ruedas tiene la tendencia de girar más rápido, se actúa instantáneamente sobre la excitación del motor, reduciendo su par. Los fabricantes de dicho dispositivo, manifiestan que utilizándolo, (debido a la uniformación del accionamiento), el coeficiente de adherencia mejora notablemente (en 3 o 4 %).

2.2.5 Encabritamiento

Debido a que la fuerza tractiva se aplica a la altura del gancho (ver fig. 2.1), y la reacción a la vía se aplica a su nivel se crea un par ($F \cdot h$), que tiene la tendencia de aumentar el peso de la locomotora sobre los ejes traseros y descargar los ejes delanteros. El fenómeno se llama "encabritamiento".

Este fenómeno de encabritar se aplica, tanto a la caja de la locomotora, como al bogie. En función del esfuerzo de tracción y de las dimensiones geométricas, se puede calcular el nuevo peso adherente para el eje delantero, el que más padece por este fenómeno.

2893503

2.3. Elementos mecánicos y eléctricos útiles en la tracción eléctrica

2.3.1 Velocidades

Por definición, se sabe que la velocidad es el espacio recorrido en la unidad de tiempo, o sea matemáticamente:

$$V = \frac{ds}{dt} \quad (2.18)$$

y se puede medir en Km/h, m/s, etc.

En el sistema de transporte se conocen varias clases de velocidades como sigue:

- Velocidad instantánea, o sea la velocidad de un vehículo a un tiempo determinado.
- Velocidad promedio entre dos estaciones del trayecto. Se calcula como cociente resultante al dividir el espacio recorrido entre las dos estaciones, por el tiempo que transcurrió. Naturalmente, hubo necesidad de un tramo de aceleración, otro de deceleración, tramos de velocidad constante, restricciones de recorrido, etc., donde las velocidades no fueron las mismas.
- Velocidad comercial o promedio, para toda la línea o trayecto, la cual incluye el tiempo de paradas en las estaciones intermedias.
- Velocidad máxima, la cual el vehículo puede alcanzar en algún momento en su recorrido.

2.3.2 Trabajo, potencia, energía

De la física se sabe que:

$$T = F.L(kgm) \quad (2.19)$$

Donde:

T = trabajo. (kgm) o (Nm)

L = espacio recorrido (m)

F = fuerza de tracción (kgf) o (N) y la potencia.

$$P = \frac{T}{t} = \frac{F.L}{t} = \frac{F.V}{75}(HP) \quad (2.20)$$

Haciendo transformaciones, se puede llegar a expresiones específicas, de forma:

$$W_{esp.} = \frac{W_a}{GL} \quad (2.21)$$

Donde:

W_{esp} = energía específica en Wh/t. km.

W_a = energía absorbida del hilo de contracto en W h.

G = peso del tren en toneladas.

L = recorrido en Km.

Este dato es específico para una línea de un recorrido determinado y sirve para comparar distintos perfiles entre sí. Dependiendo del perfil y del tráfico (t.Km) y juzgando la energía específica se puede decidir sobre la utilidad de electrificar una vía, o la elección entre las cuales se debe electrificar primero. Ejemplo: Un perfil de montaña con un tráfico fuerte (mucho volumen), tiene prioridad de electrificación contra un perfil plano y poco tráfico.

2.3.3 Gráfica de circulación

En un sistema rectangular se toma sobre el eje de las abscisas, el tiempo y sobre el eje de las ordenadas, el espacio (ver fig. 2.4).

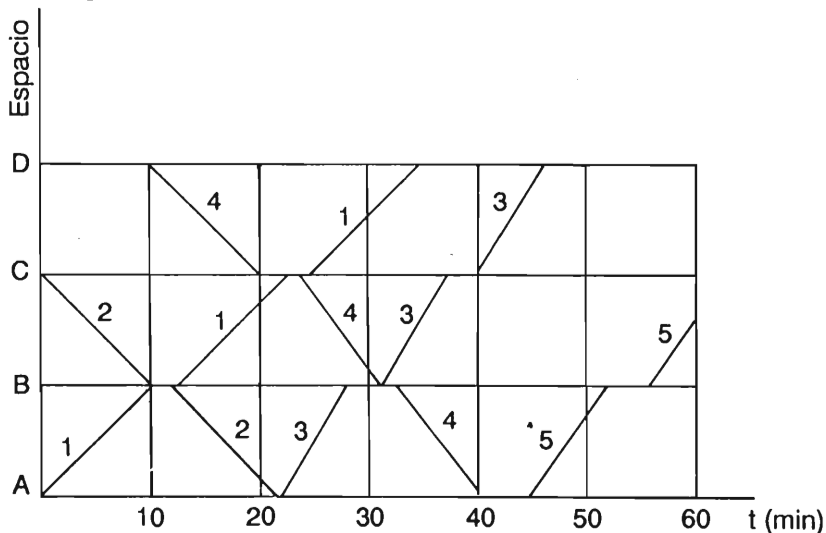


Fig. 2.4 Gráfica de recorrido de un tramo.

Los puntos A, B, C y D, marcan las estaciones y los número identifican los trenes. En la figura, los trenes 1 y 3, recorren desde A hacia D y los trenes 2 y 4 desde D hacia A. Esta gráfica está hecha para una línea sencilla. En función de ésta gráfica, se puede establecer una curva de las potencias absorbidas y al final una curva del consumo de potencia absorbida total, dato muy necesario para establecer los puntos de alimentación, así como el dimensionamiento de las subestaciones, respectivamente la catenaria. (Ver cap. 6).

2.4. Ecuación de marcha de un tren

Teniendo las resistencias que se oponen a la marcha y la fuerza motriz, se puede escribir la siguiente relación:

$$F - R_v = (1 + \gamma)m.a \quad (2.22)$$

En donde:

F = fuerza motriz total aplicada al gancho de la locomotora.

R_v = suma de las resistencias al movimiento del convoy sin incluir la resistencia debido a la aceleración.

m = la masa del convoy.

$a = \frac{dV}{dt}$ la aceleración

γ = coeficiente para considerar el momento de inercia de las masas en movimiento de rotación. (Aprox. 5%), o sea $1 + \gamma = 1.05$.

3. Locomotoras eléctricas de corriente directa

La electrificación de los transportes en C.D., se utiliza a gran escala en los sistemas urbanos (tranvías y metro). Aunque en los últimos años tiene más auge el sistema monocontinuo (25 y 50 KV, 50/60 Hz.), todavía son muy extensas las electrificaciones de los ferrocarriles en C.D. Para el transporte urbano se utiliza por lo general, los sistemas de tensión de 600 V y 750 V y para el transporte interciudades (ferrocarrilero), los sistemas de 1500 V y 3000 V. (Ver el párrafo 1.5.2).

En el sistema de 3000 V se conectan dos motores en serie, como se ve en la fig. 3.1.b.

En la figura 3.2 se muestra el diagrama elemental del circuito de fuerza, sobre una locomotora de C.D.

3.1. Circuito principal de fuerza

Para familiarizarnos, se presenta el circuito principal de fuerza de una locomotora de 1.5 KV de tipo B - B. En el caso de una locomotora similar de 3 KV resultará solamente 2 ramales.

En la figura 3.2, se notó: P-pantógrafos, S-seccionador con cuchillas para aterrizar, A-apartarrayos, CP-conmutador de puesta a tierra, IA-interruptor automático principal, RTm-relevador de tensión mínima, RDI (a), RDI (b)-relevadores diferenciales de corriente, KL-contactores de línea, RA-reóstatos para arranque y regulación, RS-relevadores de sobre carga de los motores, SM-seccionadores para sacar los motores en caso de que alguno

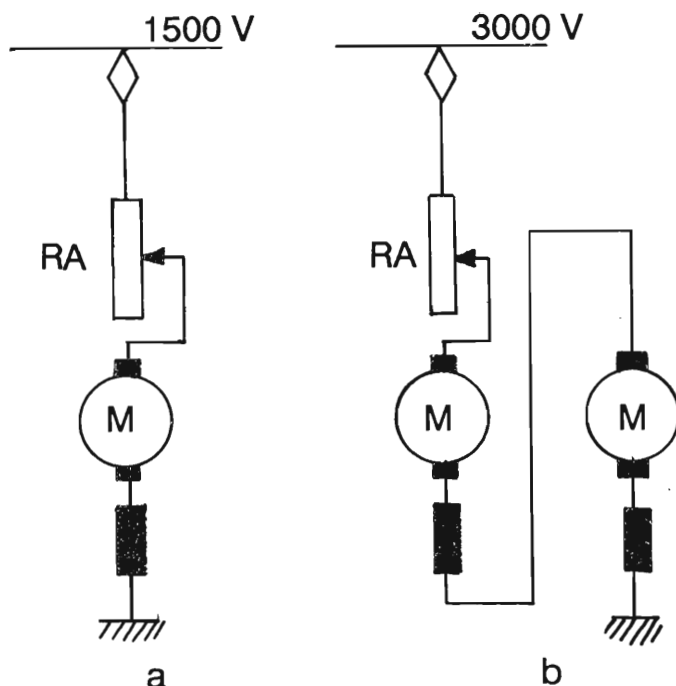


Fig. 3.1 Diagrama elemental del circuito de fuerza para una locomotora de corriente directa.

esté averiado, IV-inversores de marcha, M-motores, K-contactores para disminución de campo, b-bobina y resistencia shunt, C-contactores para interconectar los motores, CR-contactores para reóstato.

En la figura 3.3 se especifica el orden en el cual deberán cerrarse los contactores para el arranque y la marcha de la locomotora.

Para reversa son válidas todas las posiciones, excepto que todos los devanados de excitación tendrán invertido el sentido de la corriente, a través de los respectivos IV.

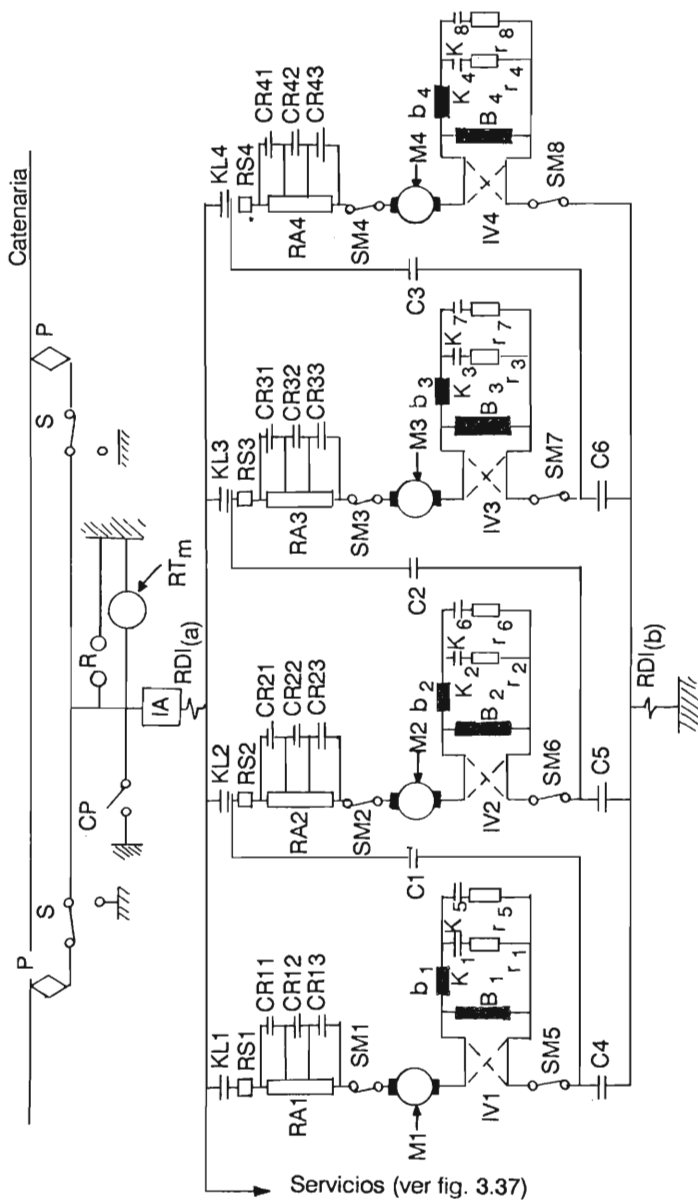


Fig. 3.2 Diagrama de los circuitos principales de fuerza de una locomotora eléctrica de corriente directa, tipo B - B.

| CONEXION | | LINEA | | | | CONTACTORES PARA RESISTENCIAS | | | | | | | | | | INTERCONEXION | | | | | | CAMPO | | | | | | | | | |
|-----------------|----------|-------|-----|-----|-----|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------|------|----|----|----|----|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | Posicion | KL1 | KL2 | KL3 | KL4 | CR11 | CR12 | CR13 | CR21 | CR22 | CR23 | CR31 | CR32 | CR33 | CR41 | CR42 | CR43 | C2 | C1 | C3 | C4 | C5 | C6 | K1 | K5 | K2 | K6 | K3 | K7 | K4 | K8 |
| SERIE | 1 | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | | |
| | 2 | ○ | | | | ○ | | | | | | ○ | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | | |
| | 3 | ○ | | | | | ○ | | ○ | | | ○ | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | | |
| | 4 | ○ | | | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | | |
| | 5 | ○ | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | | |
| | 6 | ○ | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | | |
| REDUCCION CAMPO | 1 | ○ | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ |
| | 2 | ○ | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| PASO | 1 | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | |
| | 2 | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | |
| SERIE-PARALELO | 1 | ○ | ○ | | ○ | ○ | | | ○ | | | ○ | | | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | |
| | 2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | |
| | 3 | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | |
| | 4 | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | |
| | 5 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | |
| REDUCCION CAMPO | 1 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ |
| | 2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| PASO | 1 | ○ | ○ | | | | | | | | | | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | |
| | 2 | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | |
| PARALELO | 1 | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | |
| | 2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | ○ | | | ○ | | | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | |
| | 3 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | | ○ | ○ | | | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | |
| | 4 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | |
| REDUCCION CAMPO | 1 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ | | ○ |
| | 2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

○ = CONTACTOR CERRADO

Fig. 3.3 Diagrama de los contactos contra posiciones de velocidad.

3.2. El motor eléctrico de tracción

3.2.1 Condiciones de trabajo e indicadores característicos

El motor de una locomotora está obligado a trabajar en condiciones muy pesadas, debido a los siguientes factores:

- Carga muy variable. Necesita una gran capacidad de sobrecarga.
- La tensión es muy variable y estas variaciones son muy repentinas. El pantógrafo se puede desprender de la línea de contacto.
- Está expuesto a los golpes (shocks) provocados por la vía.
- Está expuesto a la intemperie (polvo, lluvia, nieve).
- Espacio muy limitado para su montaje.
- Debe tener acceso para mantenimiento.
- Debe tener las características compatibles con las de la locomotora, desde el punto de vista par-velocidad y eficiencia.
- En caso de freno dinámico o recuperativo, debe soportar cargas como generador.

Debido a lo expuesto anteriormente, los motores para locomotoras se construyen con materiales de características elevadas y los valores típicos de inducción (T) y densidad de corriente (A/mm^2) son llevados hasta sus límites superiores. Esto significa regímenes térmicos muy fuertes, imponiendo enfriamiento forzado del motor.

Como las dimensiones son restringidas, la tensión entre dos delgas consecutivas del colector es del orden de 12-20V, lo cual implica una conmutación pesada.

Se requiere la colocación de interpolos (polos de conmutación) y algunas veces de devanado de compensación.

Constructivamente, un motor de tracción se caracteriza por los siguientes parámetros:

- Eficiencia (ver relación 3.4)
- Factor de sobrecarga.
- Consumo específico de materiales activos
- Coeficiente constructivo.

El factor de sobrecarga representa la capacidad del motor de soportar sobrecargas por lapsos relativamente pequeños (periodos de arranque). Este factor tiene que ver con la robustez del motor.

Los consumos específicos de los materiales activos están definidos por las expresiones:

$$C_{cu} = \frac{G_{cu}}{P}; C_{fe} = \frac{G_{fe}}{P} (kg/KW) \quad (3.1)$$

En donde:

C_{cu} = consumo específico del cobre (kg/KW)

C_{fe} = consumo específico del hierro (kg/KW)

G_{cu} = el peso total del cobre utilizado (kg).

G_{fe} = el peso total del hierro activo (kg).

P = potencia nominal (KW).

El coeficiente constructivo se define con la expresión:

$$K = \frac{G}{G_a} \quad (3.2)$$

En donde:

$$G_a = G_{cu} + G_{fe} \text{ (kg)}. \quad (3.3)$$

G = peso total del motor. (kg).

Entre dos máquinas de igual potencia y de mismas características la más pesada es más cara por ser más robusta.

3.2.2 Tipos de motores de C.D.

Las máquinas de c.d., se clasifican, considerando el tipo de excitación en:

- Máquinas con excitación separada.
- Máquinas con excitación en derivación (shunt).
- Máquinas con excitación serie.
- Máquinas con excitación compuesta.

Las máquinas con excitación compuesta se pueden dividir en excitación compuesta acumulativa y excitación compuesta diferencial.

Tradicionalmente el motor serie se utilizaba en exclusividad para sistemas de transporte eléctrico, debido a sus características par-velocidad, pero paulatinamente empezaron a utilizarse motores de excitación compuesta y en los últimos años, se empieza a utilizar la excitación separada (locomotoras tipo RC de ASEA).

Recordamos que una máquina de C.D. puede disponer de los siguientes devanados, caracterizados por sus respectivas resistencias:

- Devanado de armadura - r_a
- Devanado de excitación (campo) - r_f
- Devanado de interpolos - r_d
- Devanado de compensación - r_c

En función del tipo de motor en particular, se le incluyen las respectivas resistencias, en la ecuación que caracteriza su operación.

3.2.3 Parámetros principales para la definición de un motor

Un motor eléctrico para la tracción se define con los siguientes parámetros:

- Clase de corriente (C.D. C.A. monofásica de baja frecuencia, C.A. de frecuencia nominal, etc).
- Tensión nominal (V), que representa la tensión para la cual estuvo diseñado el motor.
- Corriente nominal (A), es la corriente a la cual el motor puede funcionar, en condiciones normales, (tensión, temperatura ambiental, frecuencia, enfriamiento, humedad), tiempo ilimitado, sin que la temperatura de alguna de sus partes rebase los límites establecidos por su clase de aislamiento.
- Velocidad nominal (RPM), es la velocidad que corresponde a la tensión y la corriente nominales (eventual frecuencia nominal).
- Potencia nominal (KW ó HP)), es la potencia entregada a la flecha, para la tensión y la corriente nominales.
- Eficiencia nominal (η en %), definida como:

$$\eta = \frac{p \cdot 100}{p_a} = \frac{p}{p + \Delta p} \cdot 100(\%) \quad (3.4)$$

En donde:

p = potencia nominal

p_a = potencia absorbida

Δp = Suma de todas las pérdidas en el motor

En la tracción eléctrica, además de los parámetros ya establecidos, se establecen valores para la carga unihoraria, los cuales corresponden a la corriente, a la potencia y a la eficiencia, suponiendo que la tensión queda definida como la misma.

En el caso de la corriente, por ejemplo, el valor unihorario es la corriente máxima absorbida del motor en el tiempo de una hora, a la tensión nominal sin que alguna de sus partes rebase los límites de temperatura. (Prácticamente la corriente resulta de la relación 3.89). Este caso implica que el motor arranque a la temperatura ambiental, al inicio de la respectiva prueba.

Hubo necesidad de introducir estos valores debido a que las exigencias de las locomotoras así lo requieren. (Arranques, pendientes, frenos, etc).

El valor de la corriente unihoraria es mayor que su corriente nominal. Se define el coeficiente de duración para un motor de tracción como:

$$K_d = \frac{I}{I_h} \quad (3.5)$$

En donde:

I = corriente nominal

I_h = corriente unihoraria.

Algunos autores indican los siguientes valores prácticos para K_d :

0.5....0.6 Para motores a prueba de explosión (de masa muy grande)

0.7....0.88 Para motores autoventilados (tranvías, trolebuses)

0.85...0.94 Para motores de ventilación forzada (locomotoras eléctricas).

3.2.4 Límites de calentamiento para los motores de tracción

La UIC (Unión Internacional de Ferrocarriles) establece, en función del aislante y el método de medición, los valores límites de temperatura para los motores de tracción instalados sobre vehículos eléctricos, según la tabla 3.1.

Con respecto a esta tabla, hay que mencionar que:

- La temperatura del medio ambiente no rebase 40°C°.
- El método de medición de la temperatura del colector (termómetro eléctrico) consta en aplicar dicho termómetro sobre las partes accesibles del colector, en los lugares supuestamente más calientes, enseguida que el motor paró su marcha. (Se supone que el termómetro eléctrico es de respuesta rápida, diferente al termómetro de mercurio).

El método de medición por resistencia consta en la medición de la resistencia del devanado en cuestión al final de la prueba, conforme a la relación:

$$\Theta = 235\left(\frac{R - R_a}{R_a}\right) + \Theta_a \quad (3.6)$$

En donde:

Θ_a = Temperatura ambiental (°C).

R = Resistencia al final de la prueba.

R_a = Resistencia en frío, al inicio de la prueba, R_a . (Considerada igual a la temperatura ambiental).

Θ = Temperatura de la resistencia al final de la prueba (°C).

Con respecto a la definición de las clases de aislamiento, se recuerda lo siguiente:

CLASE A: Aislamientos de materiales naturales, fibrosos, impregnados. Estabilidad térmica máxima 105°C.

CLASE E: Aislamientos con base de resinas naturales o artificiales (epóxicas). Estabilidad térmica máxima 120 °C.

TABLA 3.1
LIMITES DE CALENTAMIENTO PARA LOS MOTORES
ELECTRICOS DE TRACCION
(Pruebas de Taller)

| <i> AISLANTE</i> | <i> REGIMEN</i> | <i> PARTE DEL MOTOR</i> | <i> METODO DE MEDICION DE TEMPERATURA</i> | <i> CALENTAMIENTO °C</i> |
|------------------|-----------------|----------------------------------|---|--------------------------|
| CLASE A | CONTINUO | Devanados del estator y armadura | Resistencia | 85 |
| | | Colector | Termómetro Eléctrico | 100 |
| | UNIHORARIO | Devanados del estator y armadura | Resistencia | 100 |
| | | Colector | Termómetro Eléctrico | 105 |
| CLASE E | CONTINUO Y | Devanado de armadura | Resistencia | 105 |
| | UNIHORARIO | Devanado del estator | Resistencia | 115 |
| CLASE B | CONTINUO Y | Devanado de armadura | Resistencia | 120 |
| | | Devanado del estator | Resistencia | 130 |
| | UNIHORARIO | Colector | Termómetro Eléctrico | 105 |
| CLASE F | CONTINUO Y | Devanado de armadura | Resistencia | 140 |
| | | Devanado del estator | Resistencia | 155 |
| | UNIHORARIO | Colector | Termómetro Eléctrico | 105 |
| CLASE H | CONTINUO Y | Devanado de armadura | Resistencia | 160 |
| | | Devanado del estator | Resistencia | 180 |
| | UNIHORARIO | Colector | T. Eléctrico | 105 |

CLASE B: Aislamientos con base de materiales naturales (fibras de vidrio, mica, asbesto), con aglutinamientos orgánicos. Estabilidad térmica máxima $130^{\circ}C$.

CLASE F: Aislamientos idénticos que para la clase B, solamente que los aglutinantes serán de materiales sintéticos. Estabilidad térmica máxima $155^{\circ}C$.

CLASE H: Aislamientos idénticos que la clase B, pero los aglutinamientos serán de naturaleza sílico-orgánicos. Estabilidad térmica máxima $180^{\circ}C$.

Debido a las condiciones de operación que enfrentan los motores de tracción, estos se construyen normalmente, con las clases de aislamientos F y H.

3.2.5. Ecuaciones generales de la máquina de C.D.

En la figura 3.4 se presenta esquemáticamente el corte transversal de una máquina de C.D. En esta figura se representan tres devanados: el devanado de armadura, el devanado de los polos

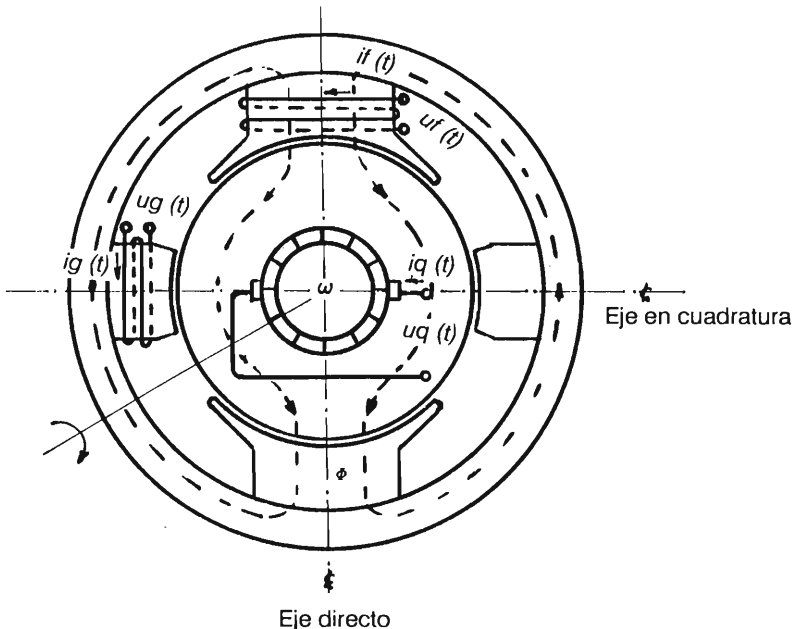


Fig. 3.4 Devanados principales de una máquina de corriente directa.

principales y el devanado de los polos auxiliares, que representan los devanados más comunes de una máquina de C.D., anotando con los subíndices q, f y g, respectivamente.

Para estos devanados se establecen las siguientes relaciones generalizadas:

$$\mu_f(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt}$$

$$\mu_q(t) = R_q i_q(t) + L_q \frac{di_q(t)}{dt} + L_{qg} \frac{di_g(t)}{dt} + L_{qf.w} i_f(t) \quad (3.7)$$

$$\mu_g(t) = R_g i_g(t) + L_g \frac{di_g(t)}{dt} + L_{qg} \frac{di_q(t)}{dt}$$

En donde se notó:

μ = Voltaje a las terminales del respectivo devanado en función de tiempo.

i = Corriente que circula por dicho devanado en función de tiempo.

R = Resistencia del devanado.

L_f, L_q, L_g = Autoinductancia del propio devanado.

L_{qg} = Inductancia mutua de acoplamiento, entre dos devanados, de tipo transformador. (Sobre el mismo eje).

L_{qf} = Constante de acoplamiento, que determina el voltaje rotacional.

w = Velocidad de rotación angular.

Para establecer estas relaciones se aplicaron la ley de Ohm y la ley de inducción electromagnética.

En la relación $\mu_q(t)$ aparecen por ejemplo:

- Caída de voltaje de tipo resistivo
- Caída de voltaje de tipo autoinductivo
- Caída de voltaje de tipo transformador
- Caída de voltaje (o voltaje inducido) de tipo rotacional, típico para la máquina de corriente directa.

Para la ecuación del par se escribe la siguiente relación mecánica:

$$M_e = M_t + J \frac{dw}{dt} \quad (3.8)$$

o sea, el par eléctrico desarrollado por el motor es igual al par mecánico entregado, más el par de aceleración.

Donde:

M_t = El par del motor entregado a su eje. (Par mecánico).

M_e = Par eléctrico, desarrollado por el motor.

J = Momento de inercia global reducido al eje del motor.

De las ecuaciones generalizadas (3.7) se deducen las ecuaciones prácticas de operación en estado *casi estacionario*, en las cuales no se considera la variación en tiempo, o sea para:

$$\frac{di(t)}{dt} = 0$$

$$U_f = R_f I_f$$

$$U_q = L_{qf} \cdot \omega \cdot I_f + R_q \cdot I_q \quad (3.9)$$

$$U_g = R_g I_g$$

Con el fin de encontrar la relación del par eléctrico, partiremos de la expresión de conversión electromecánica de la potencia.

$$P = \omega M = U_q I_q \text{ (W)} \quad (3.10)$$

Si la expresión de U_q (3.9) se multiplica por I_q , encontramos la expresión eléctrica de la potencia.

$$U_q I_q = L_{qf} \cdot \omega \cdot I_f \cdot I_q + R_q \cdot I_q^2 \quad (3.11)$$

El segundo término del lado derecho de esta igualdad representa una pérdida de energía, de tipo Joule, en el devanado de armadura. Separando la expresión del par, resulta:

$$M = \frac{U_q I_q}{\omega} = L_{qf} \cdot I_f \cdot I_g \quad (3.12)$$

Por otro lado, la corriente I_f es la magnitud que crea los amper vueltas necesarios para la obtención del flujo magnético

en la máquina. Esto quiere decir que si consideramos a I_f como variable independiente, el flujo magnético representa la variable dependiente, conforme a;

$$\phi = f(I_f) \quad (3.13)$$

Esta dependencia es una función no lineal debido a:

- El fenómeno de saturación magnética, en su circuito magnético.
- El fenómeno de reacción de armadura.

En otra forma se puede escribir:

$$U_f = R_f \cdot I_f \quad (3.14)$$

$$U_g = K \cdot n \cdot \phi + r \cdot I_g \quad (3.15)$$

$$M_e = K_1 \cdot \phi \cdot I_g \quad (3.16)$$

Dado que la corriente de los polos auxiliares es la misma que la de la armadura, desaparece la relación de U_g , notando:

$$r = R_q + R_g \quad (3.17)$$

Si existiera devanado de compensación, tendría esta misma situación.

En la práctica, las constanas K y K_1 toman los valores:

$$K = \frac{pN}{60a} y K_1 = \frac{pN}{2\pi a} \quad (3.18)$$

En donde:

p=número de pares de polos.

a=número de pares de vías de corriente en paralelo.

N=número de conductores activos del devanado de armadura.

n=velocidad en rpm.

ϕ =el flujo magnético total por polo en Wb.

Las constantes K y K_1 son datos específicos de construcción.

Con este valor de la constante K (3.18), el voltaje resulta directamente en volts. Con el valor de la constante K_1 expresada en la relación 3.18, el par resulta en Nm en la relación 3.16. Si deseamos obtener el par en kgfm, tenemos que afectar esta constante con la relación 2.1, o sea, dividir la constante K_1 por 9.81.



Debido a sus características, el motor de C.D., serie se considera el más adecuado para el transporte eléctrico y por esta razón nos ocuparemos más detalladamente de éste.

3.2.6 Características funcionales del motor de C.D. tipo serie

Las ecuaciones del motor de corriente directa tipo serie quedan en la siguiente forma:

$$U = K.n.\phi + r.I \quad (3.19)$$

$$M = K_1.\phi.I \quad (3.20)$$

$$r = R_f + R_q + R_q \text{ (conexión serie)} \quad (3.21)$$

$$P_a = U.I \quad (3.22)$$

$$P = P_a.\eta_m \text{ (ver relación 3.4)} \quad (3.23)$$

La distribución de pérdidas en un motor de corriente directa, tipo serie, de construcción actual se muestra en la figura 3.5 (es válido también, para motores de corriente ondulada), en donde se notó:

P_{cu} = pérdidas en cobre.

P_{fe} = pérdidas en hierro.

P_{mec} = pérdidas mecánicas.

P_s = pérdidas suplumentarias.

$E_c = K n \phi$ = voltaje rotacional.

Cuando hablamos de las características funcionales de un motor, nos referimos especialmente a $n(I)$, $M(I)$, $\eta(I)$, y la característica

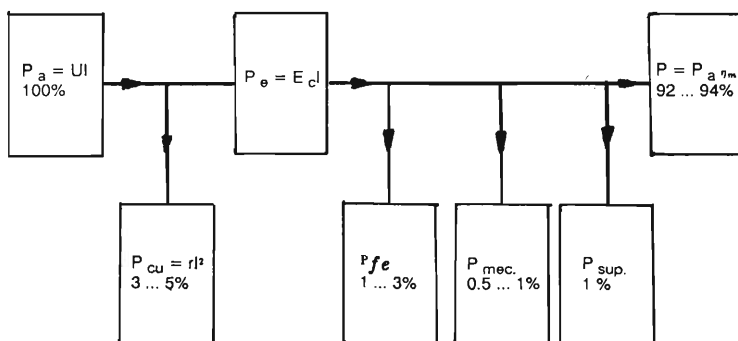


Fig. 3.5 Pérdidas en un motor de corriente directa tipo serie.

mecánica $M(n)$. No debemos perder de vista la característica de magnetización $\phi(I_f)$.

Estas características se construyen por el fabricante del motor, a la tensión nominal y se entregan al comprador.

Nos ocuparemos a continuación de la parte más relevante de estas características, que más interesan para el transporte.

3.2.6.1 Característica de magnetización $\phi(I_f)$

En el párrafo 3.2.5 se menciona la relación entre la corriente de excitación I_f y el flujo magnético ϕ así como las razones para los cuales esta característica no es lineal.

Para una máquina construida, la característica de magnetización está bien definida y tiene la forma típica como se muestra en la figura 3.6.

Sobre esta característica se distinguen tres zonas importantes:

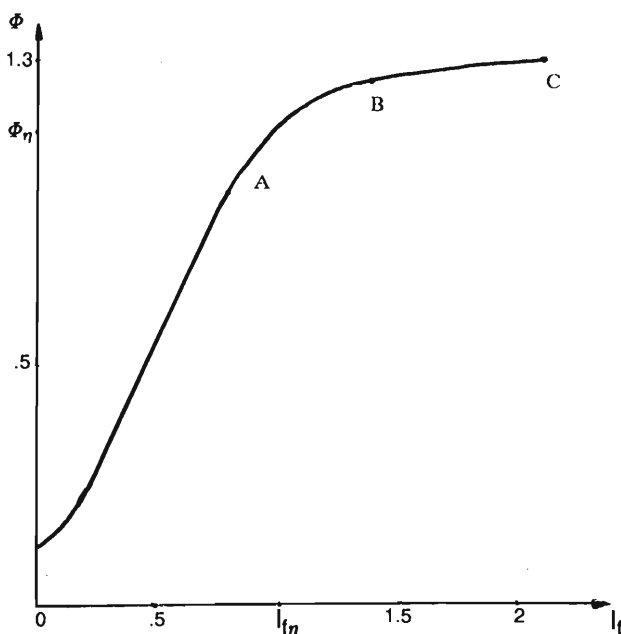


Fig. 3.6 Característica típica de magnetización para una máquina de c.d.

- Zona O-A. en la cual podemos considerar la linealidad (la curva parte desde arriba de cero, debido al magnetismo remanente).
- Zona A-B, fuertemente no lineal, debido al fenómeno de saturación magnética del hierro.
- Zona B-C, que se acerca a la linealidad.

En la zona O-A con muy poca corriente de excitación logramos flujos magnéticos importantes, mientras que en la zona B-C por más que aumentamos la corriente de excitación apenas se nota el incremento del flujo.

El punto de operación nominal, para una máquina de C.D., se sitúa en algún lugar en la zona A-B. Su colocación depende de la inducción de diseño, de los materiales magnéticos que constituye su circuito magnético (acero al silicio, acero laminado, acero fundido, etc) y de las dimensiones geométricas.

3.2.6.2 Característica de velocidad $n(I)$

De la relación de voltaje (3.19) resulta:

$$n = \frac{U - r \cdot I}{K \cdot \phi} \quad (3.24)$$

Para valores pequeños de ϕ , en un régimen fuera de saturación, podemos considerar la linealidad:

$$\phi = K_2 I \quad (3.25)$$

En el caso del motor serie:

- para $I \rightarrow 0$; $n \rightarrow \infty$

- para $I = \frac{U}{r}$; $n = 0$

de donde resulta que $n(I)$ es una curva de aspecto hiperbólico, como se aprecia en la figura 3.7.

Se desprende que el motor de C.D., serie, no puede trabajar en vacío, caso que no ocurre en el transporte eléctrico.

La característica $n(I)$ para el motor de C.D. serie es típica y elástica. Si otro motor dispone de una característica semejante, se le nombra de "tipo serie".

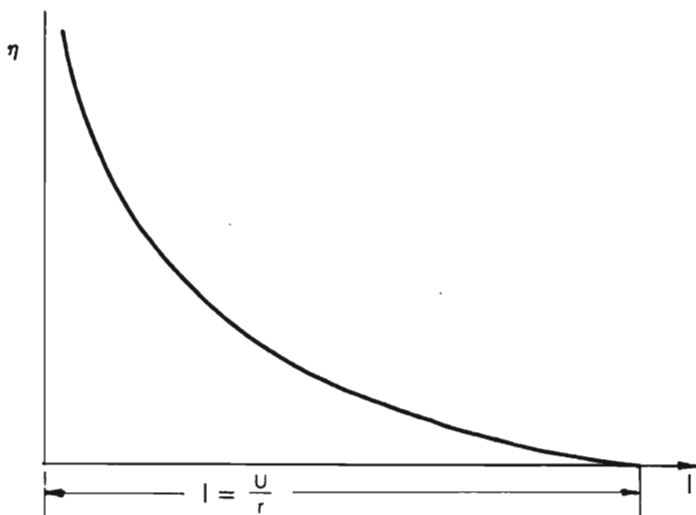


Fig. 3.7 Característica de velocidad $n(I)$ para un motor tipo serie.

3.2.6.3 Característica del par $M(I)$

Si consideramos un régimen fuera de saturación (relación 3.25) resulta para el par (relación 3.16).

$$M = K_3 \cdot I^2 \quad (3.26)$$

En el caso de un régimen saturado, se puede decir que $\phi =$ constante y:

$$M = K_4 \cdot I \quad (3.27)$$

Se puede decir que en un principio, para corrientes pequeñas, la característica tiene forma parabólica, mientras que para corrientes grandes, tiene forma recta. En la figura 3.8, se puede apreciar la forma típica de esta característica.

Si se conoce la característica de magnetización (fig. 3.6) y la resistencia de la máquina (r), se puede construir ésta gráfica, con las relaciones 3.13 y 3.20, dando diversos valores a la corriente I .

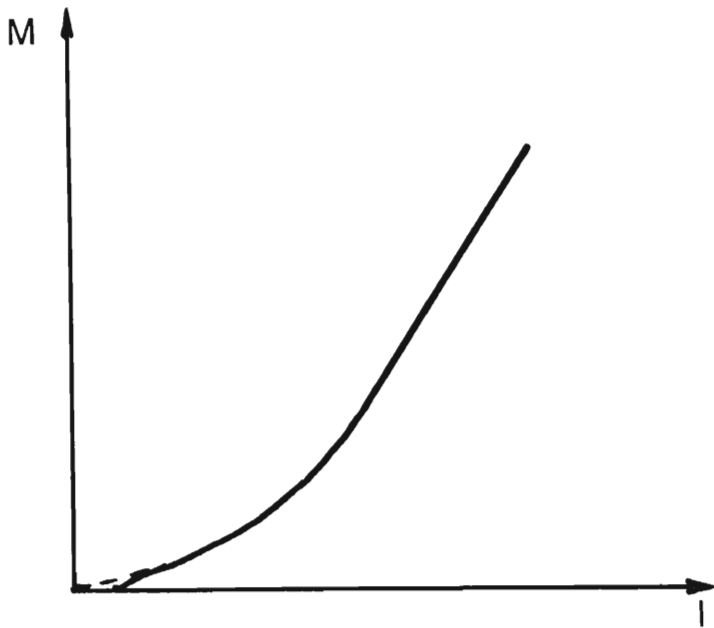


Fig. 3.8 Característica típica del par $M(I)$ para un motor tipo serie.

3.2.6.4 Característica de la potencia

Para simplificar las expresiones analíticas, se considera la potencia mecánica igual a la potencia electromagnética.

De la relación 3.19 multiplicando por I , obtenemos:

$$P_e = K n \phi I = (U - rI) \cdot I = U \cdot I - r \cdot I^2 \quad (3.28)$$

Derivando esta expresión con respecto a la corriente, obtenemos:

$$\frac{d(P_e)}{dI} = U - 2rI$$

y para encontrar un punto máximo, hacemos

$$\frac{d(P_e)}{dI} = 0,$$

resultando

$$I = \frac{U}{2r}$$

Con estos datos se puede construir el cuadro de variación de la potencia del motor en función de la corriente:

| | | | | | |
|-----------|-----|------------|-----------|------------|-------|
| Corriente | 0 | \nearrow | $U/2r$ | \nearrow | U/r |
| Derivada | (+) | (+) | 0 | (-) | (-) |
| Potencia | 0 | \nearrow | P_{max} | \searrow | 0 |

En base a este cuadro, se puede construir la gráfica de la potencia, en función de la corriente, como se muestra en la fig. 3.9.

La curva punteada se construyó considerando la simplificación mencionada anteriormente, pero la curva real es como se muestra con línea llena.

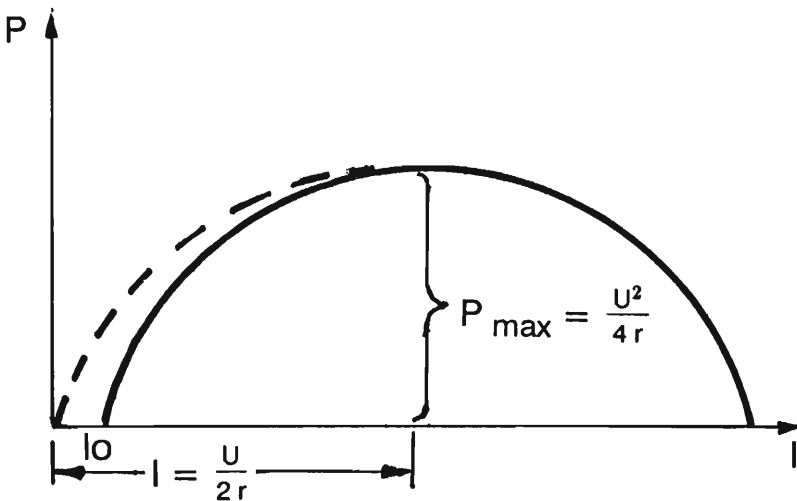


Fig. 3.9 Característica de la potencia útil para un motor tipo serie.

En la práctica el dominio de la curva se extiende solamente sobre la parte ascendente, hasta el valor de P_{max} .

3.2.6.5 Característica de la eficiencia $\eta(I)$

Con el fin de encontrar una expresión analítica, se considera la misma simplificación que en el párrafo anterior; se considera la potencia de salida igual a la potencia electromagnética.

Haciendo uso de las relaciones 3.23 y 3.28, encontramos:

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{(U - rI)I}{UI} = 1 - \frac{rI}{U} \quad (3.29)$$

La curva de la eficiencia real difiere con respecto a esta eficiencia aproximada (ver gráfica en la fig. 3.10), debido a las otras pérdidas (en hierro, mecánicas y suplementarias, como aparecen en la fig. 3.5).

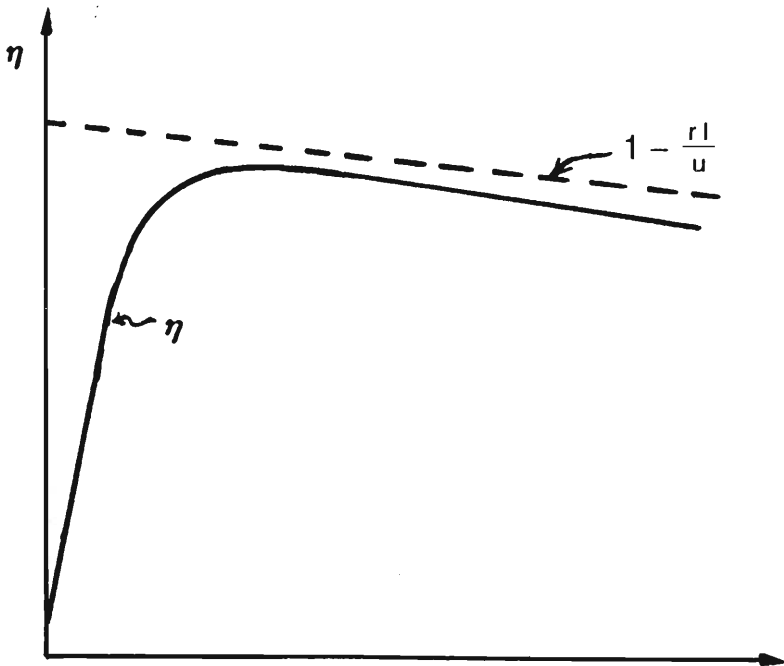


Fig. 3.10. Característica de la eficiencia típica para una máquina de corriente directa.

En los motores de tracción, por lo general, el valor de la eficiencia máxima corresponde alrededor de 0.75 In.

3.2.6.6 Característica mecánica $M(n)$

Hasta ahora hemos visto las características $n(I)$ y $M(I)$. Eliminando gráficamente la variable I , resulta la característica $M(n)$. (ver fig. 3.11).

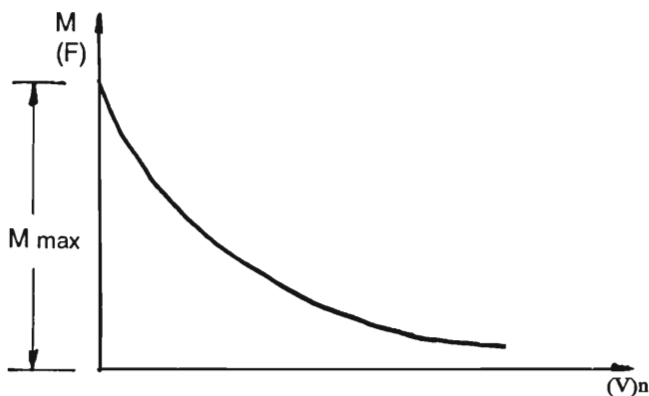


Fig. 3.11. Característica mecánica $M(n)$ para un motor tipo serie.

Analíticamente se puede calcular esta característica partiendo de las ecuaciones 3.19 y 3.20. Para un régimen fuera de saturación, expresado por la relación 3.25, la cual sustituida en 3.19 resulta:

$$U = Kn(K_2I) + rI = (K_5n + r)I$$

De donde:

$$I = \frac{U}{K_5n + r} \quad (3.30)$$

y sustituyendo este valor en 3.26, resulta:

$$M = K_3 \left(\frac{U}{K_5 \cdot n + r} \right)^2 \quad (3.31)$$

En el caso del arranque, cuando $n=0$, debido a que la corriente toma valores grandes, resulta que el par es muy grande, en este caso llegamos a la saturación, en cuyo caso se aplica la relación 3.27, resultando:

$$M = K_3 \left(\frac{U}{K_5 n + r} \right) \quad (3.32)$$

De todas maneras, en el caso del arranque, el par sigue siendo grande. Esta característica, que representa la relación entre dos parámetros mecánicos, de donde su nombre, es típica para un motor tipo serie.

3.2.6.7 Característica tractiva F (V)

Se define la característica tractiva de un vehículo motriz, la variación de la fuerza tractiva F, en función de su velocidad V.

Recordamos lo afirmado anteriormente, que el motor eléctrico está conectado a través de engranes directamente al eje motriz, de tal manera que la velocidad del motor en RPM se transforma en la velocidad del vehículo en Km/h y el par del motor en kgfm (ó Nm) se transforma en fuerza tangencial aplicada sobre la vía, ó exprensándola de otra manera, en fuerza tractiva del vehículo, en kgf (ó N). (Ver fig. 2.1).

Para hacer las respectivas transformaciones, se tiene que considerar las relaciones de transmisión de los engranes, así como el diámetro de la rueda y las eficiencias.

La eficiencia del engrane se considera por lo general, de 0.97...0.98 y la eficiencia del motor 0.92...0.94,

De la figura 2.1 se puede escribir:

$$V = \frac{\pi D n 60}{1000 u} = k n \text{ (Km/h)}, \text{ y } M w \eta_t = F \left(\frac{D}{2} \right) w_1 \text{ (igualdad de potencia)}$$

De donde:

$$F = \left(\frac{2}{D} \right) \cdot u \cdot \eta_t \cdot M = K' M \text{ (kgf)} \quad (3.34)$$

Donde se notó:

n = velocidad del motor en RPM.

ω_1 = velocidad angular del eje motriz

D = diámetro de la rueda motriz

η_t = eficiencia del engrane

$u = \frac{\omega}{\omega_1} = \frac{Z_2}{Z_1}$ = relación del engrane.

M = el par del motor.

Combinando la relación 3.24 con la relación 3.33 resulta

$$V = \frac{U - rI}{K\phi} \quad (3.35)$$

respectivamente la relación 3.20 con la relación 3.34 resulta:

$$F = K'\phi I \quad (3.36)$$

Obviamente, las constantes de proporcionalidad serán distintas. Sustituyendo las características $n(I)$, con $V(I)$ respectivamente, $M(I)$ con $F(I)$ y eliminando la corriente I , resulta la característica tractiva $F(V)$.

La forma típica de esta característica es similar a la característica mecánica (ver fig. 3.11), apuntando en las ordenadas la fuerza tractiva y en las abscisas, la velocidad en km/h.

Esta característica satisface los requerimientos de un vehículo, en donde se requiere, para velocidades pequeñas una fuerza tractiva grande y a medida que la velocidad aumenta, la fuerza tractiva disminuye, cuando se necesita vencer menos resistencia.

3.2.7 características funcionales del motor de C.D. en derivación (shunt)

Para este tipo de máquina se aplican las mismas relaciones 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 y la relación derivada 3.24; así como la característica de magnetización.

De la expresión 3.24 resulta que si ϕ = constante, e I aumenta, n disminuye. Por otro lado, debido a la reacción de armadura, el flujo disminuye con la carga (I).

En máquinas normales, con interpolos, esta disminución es menos sensible que la primera, de tal manera que la característica $n(I)$ tiene, por lo general, la forma como se muestra en la figura 3.12.

La variación normal de la velocidad de vacío hasta carga plena, para una máquina de C.D., tipo derivación, es del orden de 2 a 8%.

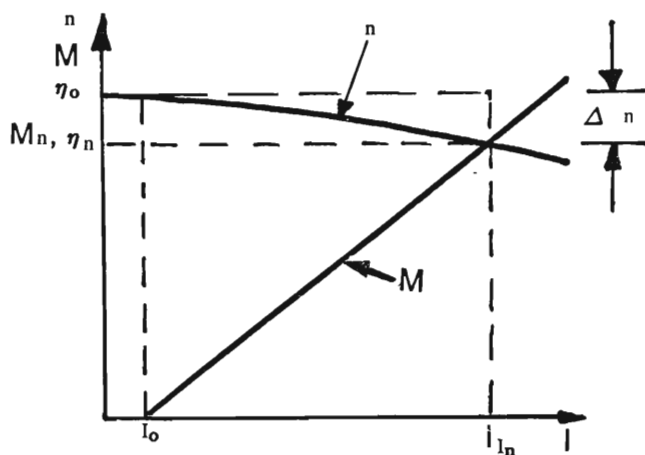


Fig. 3.12 Características de la velocidad $n(I)$ y del par $M(I)$ para un motor shunt.

Como hemos considerado que el voltaje aplicado es prácticamente constante, esta característica se puede aplicar y para el motor de excitación separada.

Este tipo de característica se denomina “rígida” o “shunt”. La característica del par $M(I)$, resulta ser, prácticamente una recta, como podemos ver en la misma figura 3.12.

La característica mecánica $M(n)$, resulta de la combinación de las anteriores. A la postre esta característica será la tractiva $F(V)$, con una forma típica, como se muestra en la figura 3.13.

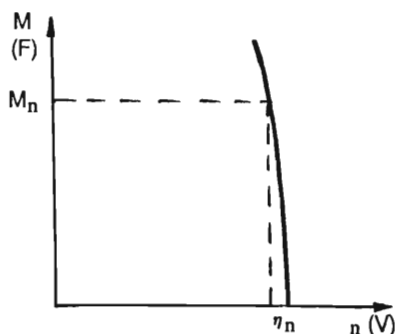


Fig. 3.13 Característica mecánica $M(n)$ para un motor shunt.

3.2.8 Características electromecánicas universales de los motores de tracción

Cuando se diseña un vehículo motriz (ejemplo una locomotora), no se puede disponer del motor y sus características. Pero, sí, se puede decidir que tipo de motor se quiere emplear. (Ejemplo un motor de C.D. tipo serie).

Las características universales son características porcentuales, representando la interdependencia de las variables consideradas. Ejemplo: para varios motores del mismo tipo y la misma potencia, se construyen las características porcentuales $V(I)$, sobre una misma figura. Resulta una familia de curvas de la misma forma pero en una pequeña dispersión.

La curva representante de esta familia de curvas, es la característica universal, para las magnitudes consideradas. Con esta curva se puede proceder al diseño de los vehículos motrices, como si fuera del propio motor, que vamos a usar. Se especifica el motor de conformidad con esta curva (con la cual hemos diseñado el vehículo) y se hace algún reajuste al proyecto del vehículo conforme a la curva real del motor, en caso que el motor real, construido difiera en algo con respecto a la característica especificada. En la figura 3.14 se presenta un ejemplo de las características universales $V(I)$ y $F(I)$, considerando tres motores reales de tipo serie.

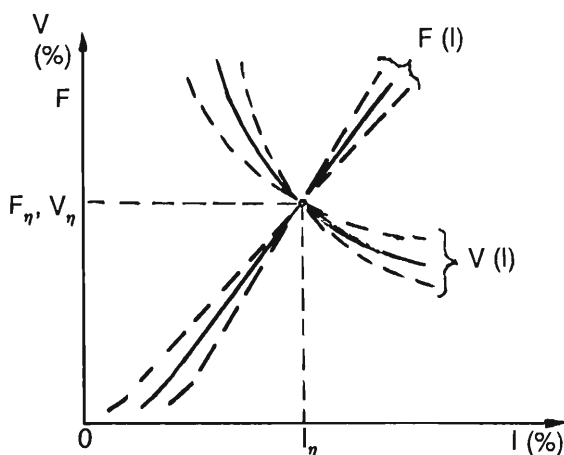


Fig. 3.14 Características $V(I)$ y $F(I)$ universales, para motores tipo serie.

3.2.9. Las ventajas de la conexión serie en los motores de tracción

En las siguientes se hará una comparación entre los motores de C.D. serie y "shunt", teniendo el mismo tamaño, mismo circuito magnético y misma armadura. Se subrayan los razonamientos, porque se utilizan motores de tipo serie en la tracción.

3.2.9.1 La dependencia de la corriente en función del par

En realidad, el par motor sufre variaciones importantes, en función de las características de la locomotora, (perfil de línea, tonelaje, régimen de tráfico, etc).

En la figura 3.15 se presentan las curvas $M(I)$ para un motor serie y un motor shunt.

Se aprecia que para los valores grandes del par, para la misma variación ΔM , resulta:

$$\Delta I \text{ motor shunt} > \Delta I \text{ motor serie} \quad (3.37)$$

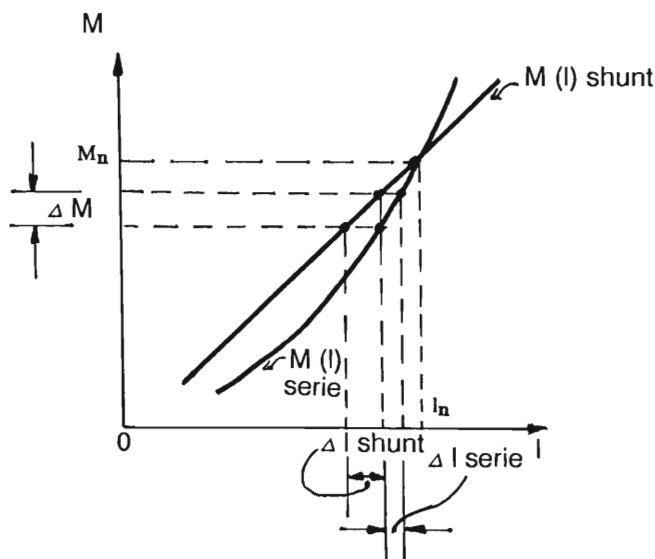


Fig. 3.15 Comparación de la variación de la corriente (ΔI), para un motor serie y un motor shunt, debido a la misma variación del par (ΔM).

Al mismo resultado llegamos si, partiendo de la relación del par, escribimos las relaciones incrementales y las relacionamos de la forma siguiente:

- para motor serie:

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta \phi}{\phi}$$

- para motor shunt:

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{\Delta I}{I}$$

En el caso del motor serie, el par depende tanto de la corriente, como del flujo magnético, mientras que para el motor shunt existe la linealidad, dando como resultado, que el motor serie tenga una variación de corriente menor que el motor shunt, para la misma variación del par.

Esta propiedad del motor serie lo favorece en cuanto a las sobrecargas y las caídas de voltaje sobre la catenaria.

3.2.9.2 La desigualdad de los diámetros de las ruedas motrices

Las ruedas de una locomotora se desgastan, disminuyendo su diámetro y esto no se produce uniformemente para todas las ruedas.

Una pequeña diferencia entre los diámetros de dos ejes motrices de una locomotora, afecta la característica de tracción a uno de los motores (correspondiente a uno de los ejes).

Si los motores son iguales, resulta que trabajarán a distintas velocidades, o sea, la velocidad es una sola para la locomotora, pero la relación de transmisión del engrane será diferente. Esto es equivalente a considerar que cada uno de los motores trabajará sobre características $M(n)$ distintas.

En la figura 3.16 se muestran las características $M(n)$, para dos motores serie y para dos motores shunt.

Como se puede apreciar, para el caso de los motores serie, el ΔM con el cual uno de los motores está sobrecargado, es mucho menos significativo, que para el caso de los motores shunt.

Esto significa que la carga entre los motores shunt se distribuye mucho más disparejo que para los motores serie.

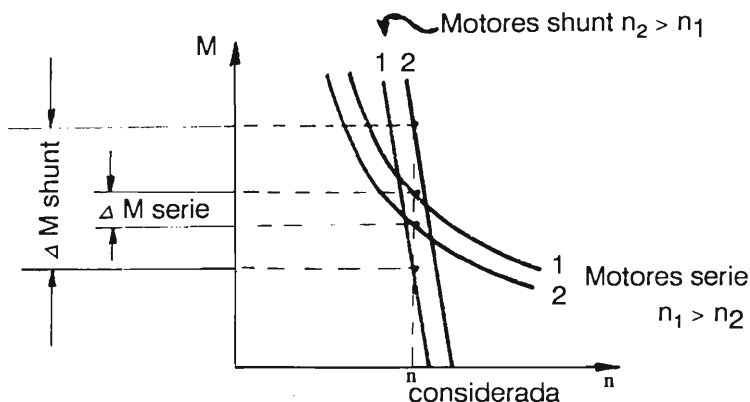


Fig. 3.16 La variación comparativa del par (ΔM), debido al desgaste desigual de las ruedas motrices.

3.2.9.3 La variación de la tensión en la catenaria

Normalmente la tensión en la catenaria varía en función de la posición del tren con respecto a la subestación, así como del número de trenes en un tramo de la línea (ver párrafo 6.4.1.).

El límite de la variación de tensión, para una locomotora, está reglamentada por la Unión Internacional de Ferrocarriles, de conformidad con la tabla 3.2.

Límites permisibles para la variación del voltaje al toma-corriente

| SISTEMA DE ELECTRIFICACION | TENSION (V) | | | |
|-------------------------------|-------------|---------|--------|-------------|
| | Mínima | Nominal | Máxima | Frecuencia |
| CORRIENTE DIRECTA | 500 | 750 | 900 | |
| | 1000 | 1500 | 1800 | |
| | 2000 | 3000 | 3600 | |
| SISTEMA MONOFASICO | 12000 | 15000 | 16500 | 16 2/3 Hz. |
| | 19000 | 25000 | 27500 | 50 (60) Hz. |

En operación normal, la variación de tensión se hace uniforme y despacio. Cuando el tomacorriente se desprende de la catenaria, la variación es muy repentina. (Desde V nominal, hasta $V=0$ y viceversa). Esto nos lleva a un régimen transitorio de operación muy fuerte. Si la tensión presenta un crecimiento relativo $\Delta U/U$ también la corriente presentará un crecimiento $\Delta I/I$.

En el caso del motor shunt, los ampervueltas de excitación son proporcionales con la tensión, mientras que en el caso del motor serie los ampervueltas de excitación son proporcionales con la corriente.

En ambos casos la fuerza contraelectromotriz, E_c crece menos rápido que los ampervueltas de excitación. Este fenómeno se puede representar por un factor $(1-\alpha)$ menor que la unidad:

Para el motor shunt se puede escribir:

$$\frac{\Delta E_c}{E_c} = (1-\alpha) \frac{\Delta U}{U} \quad (3.38)$$

y para el motor serie:

$$\frac{\Delta E_c}{E_c} = (1-\alpha) \frac{\Delta I}{I} \quad (3.39)$$

Partiendo de la relación:

$$U - E_c = RI \quad (3.40)$$

Se establece la relación incremental

$$\Delta U - \Delta E_c = r \Delta I \quad (3.41)$$

Sustituyendo la resistencia r , resulta:

$$\Delta U - \Delta E_c = (U - E_c) \frac{\Delta I}{I} \quad (3.42)$$

Nos proponemos estudiar estas relaciones más detenidamente. En el caso del motor shunt resulta:

$$\Delta U - (1 - \alpha)E_c \frac{\Delta U}{U} = (U - E_c) \frac{\Delta I}{I} \quad (3.43)$$

y simplificando queda:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta U}{U} \left(1 + \frac{\alpha E_c}{U - E_c} \right) \quad (3.44)$$

En el caso del motor serie resulta:

$$\Delta U - (1 - \alpha)E_c \frac{\Delta I}{I} = (U - E_c) \frac{\Delta I}{I} \quad (3.45)$$

de donde:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta U}{U} \left(\frac{1}{1 - \alpha \frac{E_c}{U}} \right) \quad (3.46)$$

Con el fin de comparar las relaciones 3.44 y 3.46, para cada motor, supongamos un caso real de un motor, en el cual consideramos $\alpha = 0.6$, resulta:

$$\frac{E_c}{U} = 0.96 \text{ y } \frac{E_c}{U - E_c} = 24 \quad (3.47)$$

Con estos valores introducidos en 3.44 y 3.46 resulta:

- para el motor serie:

$$\frac{\Delta I}{I} = 2.36 \frac{\Delta U}{U} \quad (3.48)$$

- para el motor shunt:

$$\frac{\Delta I}{I} = 15.4 \frac{\Delta U}{U} \quad (3.49)$$

Estos aumentos relativos representan valores absolutos apreciables (del orden de 5 a 10 veces mayores para el motor shunt, que para el motor serie) en la variación de la corriente.

En el caso del motor shunt, esto se puede explicar físicamente de esta manera: Un aumento en la tensión implicaría un aumento de velocidad para aumentar la fuerza contraelectromotriz, la cual no puede aumentar súbitamente (la aceleración del tren) y faltando el factor contrarrestante (la fuerza electromotriz), aumenta la corriente de armadura.

Para concluir esta comparación, resulta que el motor serie es mucho más ventajoso desde este punto de vista, debido a que implica riesgos menores.

3.2.9.4 Mayor flexibilidad y mejor aprovechamiento del motor serie

En este párrafo haremos de nuevo una comparación entre las características $F(V)$, o sea $M(n)$, para los motores serie y shunt. Considerando dos situaciones, en la figura 3.17a, la locomotora está solicitada para dos tipos de carga; un tonelaje pesado y uno ligero actuando sobre el mismo perfil de línea. Se aprecia que para el motor serie existe mayor flexibilidad, en cuanto a la velocidad. El tren ligero corre más rápido y el pesado más despacio, mientras que el motor shunt no presenta esta flexibilidad; la velocidad queda prácticamente constante. Esto implica exponer el motor a sobrecargas excesivas.

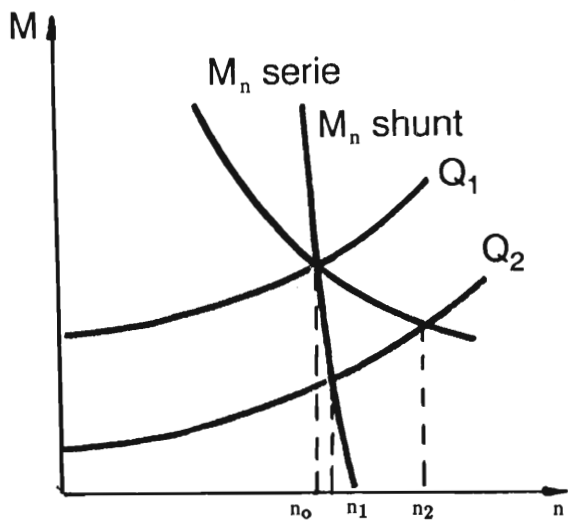
En la figura 3.17b, se presenta una situación en la cual la locomotora está moviendo el mismo tonelaje, pero en perfiles distintos. Se aprecia que el motor serie trabaja en mejores condiciones, resultando un promedio de velocidad mayor. Si sacamos los promedios:

$$n_{\text{prom}} (\text{serie}) = \frac{n_2 + n_o}{2} \quad (3.50)$$

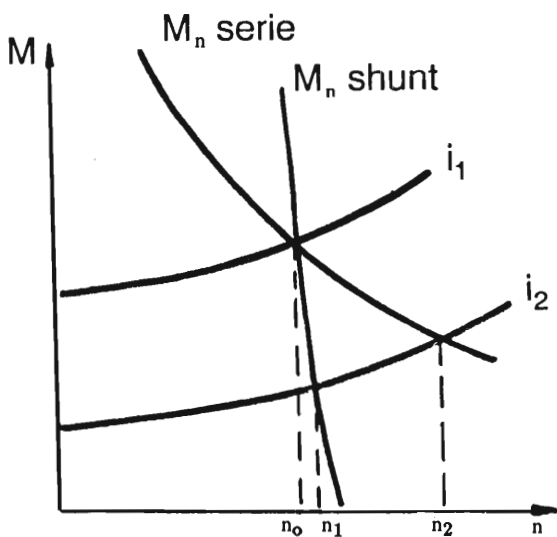
$$n_{\text{prom}} (\text{shunt}) = \frac{n_1 + n_o}{2} \quad (3.51)$$

se ve claramente que:

$$n_{\text{prom}} (\text{serie}) > n_{\text{prom}} (\text{shunt}) \quad (3.52)$$



a



b

Fig. 3.17 La elasticidad del motor serie y motor shunt: a.- carga diferente b.- perfil diferente.

3.2.9.5 Tendencia actual sobre los tipos de motores de C.D. para locomotoras

A pesar de todas las ventajas de los motores serie antes enumerados, en la actualidad existe la tendencia de utilizar motores de excitación independiente.

Esto se debe al avance de la electrónica moderna, la cual por sus sensores y circuitos integrados, es capaz de suplir las deficiencias y contrarrestar los fenómenos transitorios y de estabilidad, debido a la velocidad de respuesta de dichos componentes electrónicos.

Una vez superadas las deficiencias, se está argumentando a favor de la excitación separada por las siguientes razones:

- Cada motor se controla individualmente. Por supuesto que el conductor manda una sola señal y la parte electrónica se encarga de mantener una carga equilibrada entre los motores y el control de deslizamiento sobre cada eje motriz.

- Alto esfuerzo de tracción, aún para altas velocidades. La característica par velocidad del motor serie, se presenta anteriormente como favorable y lo es en cuanto a su flexibilidad de adaptarse a la condición de carga, pero si queremos mantener el esfuerzo máximo hasta altas velocidades, con el motor serie ya no es posible. Esta necesidad se puede considerar como moderna, debido a que se necesitan acortar los tiempos de aceleración y mantener velocidades en rangos de límites constantes para todos los trenes, debido al aumento de la frecuencia de los trenes.

- El motor de excitación separada se adapta fácilmente al freno recuperativo.

Como resulta del mismo título de este párrafo, el uso del motor de excitación independiente en el transporte se podrá generalizar en el futuro. En la actualidad se encuentra generalizado el motor serie y seguiremos sobre esta tendencia, en este trabajo.

3.2.10 Datos constructivos usuales para los motores de tracción tipo serie

Los motores serie de C.D. para tracción se caracterizan por los siguientes valores constructivos:

- Diámetro de armadura:

$$0.5 < D < 1(m) \quad (3.53)$$

- El valor de 1.5 m es el máximo que puede admitir, constructivamente, una locomotora.

- Longitud de armadura:

$$0.2 < L < 0.5(m) \quad (3.54)$$

Estos valores resultan prácticos como consecuencia de los valores de la inducción y de la velocidad periférica.

- Velocidad lineal de armadura.

$$V_i = \pi D n(m/s) \quad (3.55)$$

Está limitada por los esfuerzos mecánicos a 90 m/seg. Prácticamente se consideran como nominales valores del orden de 20...45 m/s.

- Velocidad lineal del colector,

$$V_K = \pi D_K n(m/s) \quad (3.56)$$

Este parámetro tiene valor límite 60 m/s.

Está limitado por razones de conmutación, como tiempo en sí, así como por el contacto.

Un tiempo de conmutación muy corto empeora el fenómeno en sí y por otro lado un corto tiempo de contacto realiza un mal contacto (éste último puede ser interpretado como contacto mecánico).

En régimen nominal se toma $V_K = 15.....30$ m/s.

- Voltaje promedio entre dos delgas consecutivas del colector:

$$e = \frac{2 \cdot p \cdot U}{i} (V) \quad (3.57)$$

En donde:

U= tensión nominal del motor

p= número de pares de polos.

i= número total de delgas.

Como valor práctico se toma:

$$e = 12...20V.$$

- Densidad de corriente en el cobre de armadura:

$$\delta = \frac{I_a}{S_{cu}} (A/mm^2) \quad (3.58)$$

Donde:

I_a = corriente en una vía de corriente. S_{cu} = Area del conductor, que constituye una vía de corriente.

Normalmente se toma:

$\delta = 7 \dots 8 \text{ A/mm}^2$ para motores autoventilados.

- Número de polos:

$2p = 4, \dots 6, \dots 8$ polos

Con la potencia por polo limitada a:

P polo = 200...250 KW.

- Relación de velocidades

$$K = \frac{n_n}{n_{maz}} \quad (3.59)$$

que lleva valores prácticos de 0.35...0.6.

Donde:

n_n = velocidad nominal del motor

n_{maz} = velocidad máxima del motor.

El peso del motor aumenta inversamente proporcional con esta relación.

- Peso específico.

El peso específico del motor depende del producto D.L. (diámetro y longitud de armadura). Para las construcciones actuales se pueden considerar los siguientes valores.

Para $2p=4$, D.L. = 1.15 (kgf/KW).

Para $2p=6$, D.L. = 1.00 (kgf/KW).

Para $2p=8$, D.L. = 0.85...0.90 (kgf/KW)

Para $2p=10$, D.L. = 0.80...0.85 (kgf/KW)

- La variación del peso de un motor con el voltaje nominal, para la misma potencia y la misma velocidad, se puede considerar como dado por la siguiente relación empírica:

$$\frac{G_1}{G_2} = 1 + 0.00036(U_1 - U_2) \quad (3.60)$$

Donde:

G_1 y G_2 son los respectivos pesos en kg.

U_1 y U_2 son los voltajes nominales en voltios.

3.3 Regulación de velocidad

Como hemos visto, el motor de C.D. serie dispone de una característica par - velocidad, para una tensión aplicada a sus terminales. (Ver fig. 3.11).

En la realidad, una locomotora necesita arrancar desde la velocidad cero, pasar por toda una escala de velocidades, hasta llegar a una velocidad de régimen. Además, no siempre tiene colgada una carga nominal y no siempre se puede circular con la velocidad de régimen, debido a las restricciones de la vía. De aquí resulta la necesidad de crear otras características par-velocidad, para sí tener la posibilidad de operar las locomotoras en condiciones reales.

Para entender mejor el problema, en la figura 3.18 está dibujada la característica $F(V)$ para una locomotora, similar a la característica $M(n)$ de un solo motor serie. Si sobre un perfil dado aparece una

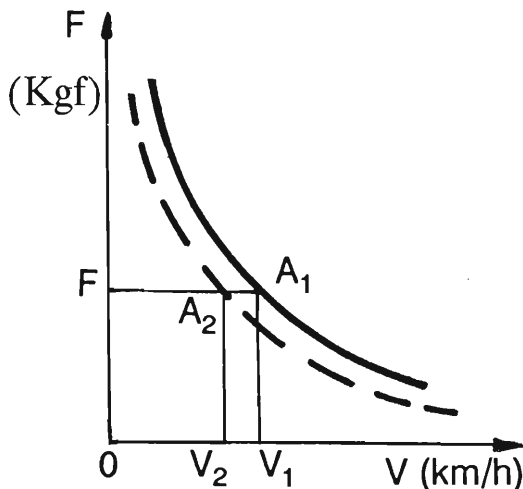


Fig. 3.18 Necesidad para crear otras características de operación.

restricción de velocidad (pasar de la velocidad V_1 a la velocidad V_2 , con la misma carga) resulta necesaria otra característica, o sea otro régimen de operar los motores de la locomotora. Esta nueva característica está dibujada con línea pausada sobre la misma figura.

Se puede entender fácilmente que se necesitaría disponer de una infinidad de características $F(V)$, en el plano F o V , limitadas por la característica del régimen nominal. El motor serie tiene la propiedad de autoregular su velocidad en función de la carga, es decir que si el par resistente disminuye, la velocidad aumenta y viceversa, sin la necesidad de alguna intervención de fuera.

Prácticamente se requiere ejercer una regulación de fuera, es decir, crear otras características sobre las cuales debe autoregularse, para establecer un punto de operación deseado.

La variedad de características $F(V)$ creadas para la operación de una locomotora, toma varios nombres como: "rango de velocidad", "rango de regulación", "posición de operación"... y cada una de estas posiciones, que significa una característica bien definida $F(V)$, resulta de la relación básica del motor serie: (3.35) en la siguiente forma:

$$V = \frac{U - (R + r)I}{K\phi} \quad (3.61)$$

Donde:

I = es la variable independiente,

V = es la variable controlada,

r y K = son constantes constructivas del motor, resultando que para variar la velocidad se nos presentan las siguientes posibilidades:

- Variar la tensión aplicada al motor, U
- Variar el flujo inductor, ϕ
- Variar la resistencia insertada en el circuito del motor R .

En la práctica de regulación de velocidad se utilizan comunmente los tres métodos enunciados.

3.3.1 Regulación de velocidad con la variación de la tensión aplicada

En el caso de la electrificación en C.D., el voltaje de la catenaria se aplica directamente a los motores de tracción.

La variación de la tensión se puede lograr solamente mediante la interconexión de los motores de varias maneras, de donde resulta que la locomotora debe disponer de un número par de motores (4, 6, 8).

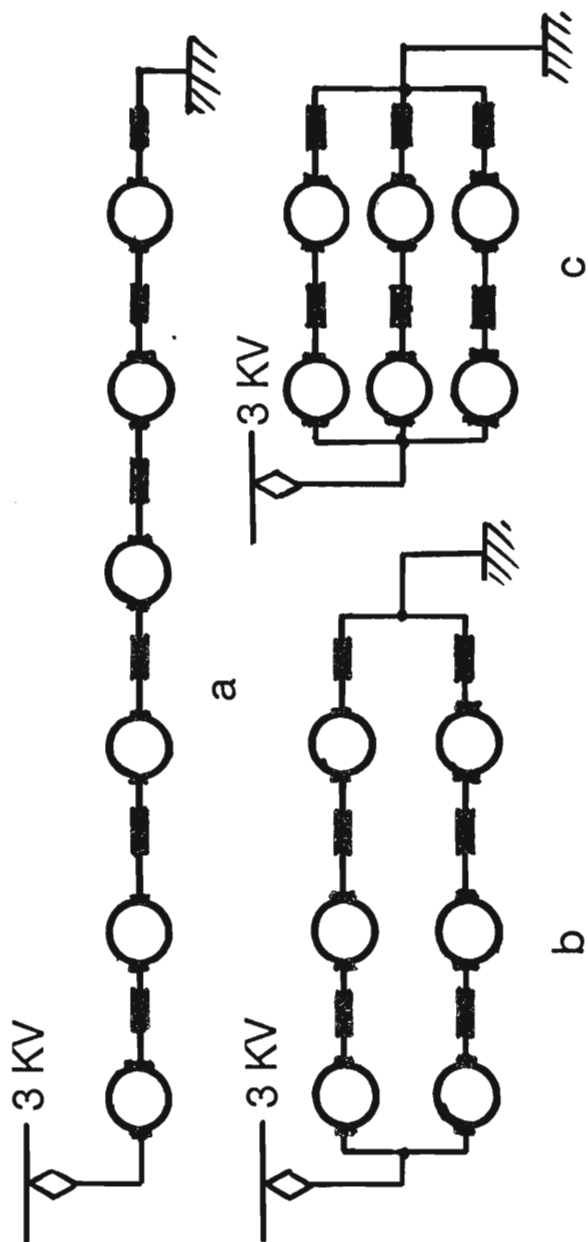


Fig. 3.19 El diagrama de conexión de seis motores a 3KV; a - conexión serie; b - conexión serie-paralelo; c - conexión paralelo (a tensión nominal).

Si por ejemplo, tenemos una locomotora de 6 motores y 3 KV en la catenaria, resultan las siguientes posibilidades de interconexión:

- Serie - resultado 500 V por c/motor
- Serie - paralelo, con 1000 V por c/motor
- Paralelo, con 1500 V por c/motor, cual, es el régimen nominal de operación.

Esto se puede ver esquemáticamente en la figura 3.19. De esta manera, resulta que se obtienen tres características $F(V)$ para la locomotora.

El paso de una conexión a otra, debe realizarse sin interrumpir la corriente en el circuito principal, cosa que provocaría efectos negativos como la variación repentina en la fuerza de tracción, o brinco de voltaje demasiado altos sobre el motor.

Usualmente se practican dos métodos de paso de una conexión a otra:

- paso por cortocircuito (por “by pass”).
- paso por puente.

3.3.1.1 El método de paso por cortocircuito

Este método consta en cortocircuito parte de los motores hasta que se realiza la siguiente conexión.

En la figura 3.20 se consideran dos motores, a manera de ejemplo, y sus posiciones intermedias para el paso de una conexión serie, a una conexión en paralelo. Para simplificar las cosas, se presentó el reóstato de un solo paso.

En la figura 3.21 se presentan las características de operación resultantes, correspondientes a esta maniobra.

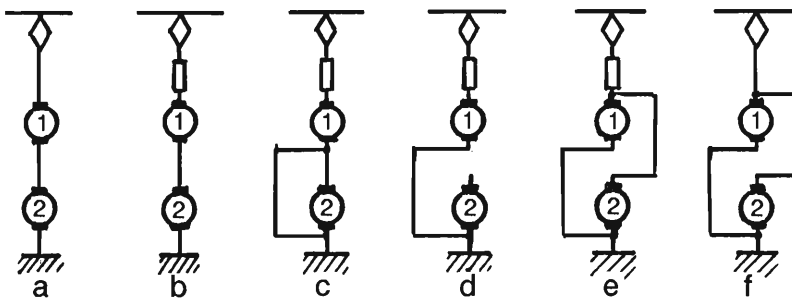


Fig. 3.20 Diagrama presentando el método de paso de serie a paralelo por cortocircuito.

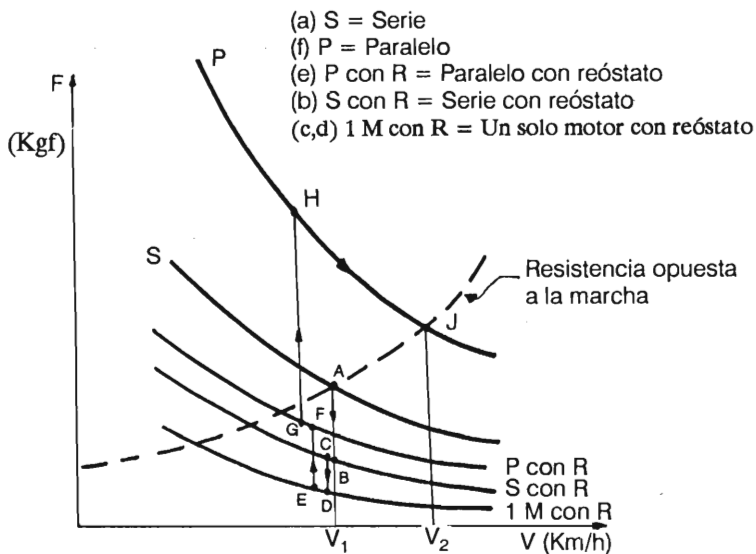


Fig. 3.21 Curvas de operación para el paso de serie a paralelo por cortocircuito. Las letras a, b, c, d, e, f, corresponden a la Fig. 3.20.

En dicha figura se supuso que la locomotora trabajaba inicialmente sobre la característica serie en el punto de equilibrio A, con la velocidad V_1 . En este instante el operador decide aumentar la velocidad a V_2 . Cuando interconecta el reóstato se desplaza sobre la característica S con R, en el punto de operación B.

El desplazamiento del punto A al punto B, se ejecuta en un instante, abriendo un contacto, a la misma velocidad.

Después de esta maniobra se ejecuta la siguiente, es decir, cortocircuitando el motor 2. Como entre las maniobras transcurrió un intervalo y como el punto B no es estable sobre la característica S con R, la velocidad tiende a disminuir hasta el punto C, instante en el cual se ejecuta la siguiente maniobra. De manera semejante se ejecutan los siguientes pasos, pasando por los puntos D, E, F, G, H y después sobre la característica F (V) natural, situación en la cual los dos motores aceleran el tren hasta el punto J, donde la fuerza desarrollada se equilibra con la resistencia al movimiento, resultando V_2 la velocidad del tren.

El tiempo del punto A al punto H deberá ser muy corto, de tal manera que prácticamente no se nota la disminución de velocidad,

pero si, la sucesión de las posiciones de paso quedan bien definidas, para delimitar los fenómenos eléctricos.

3.3.1.2 El método de paso por puente

En la siguiente figura 3.22 se presenta gráficamente éste método, el cual consta de lo siguiente:

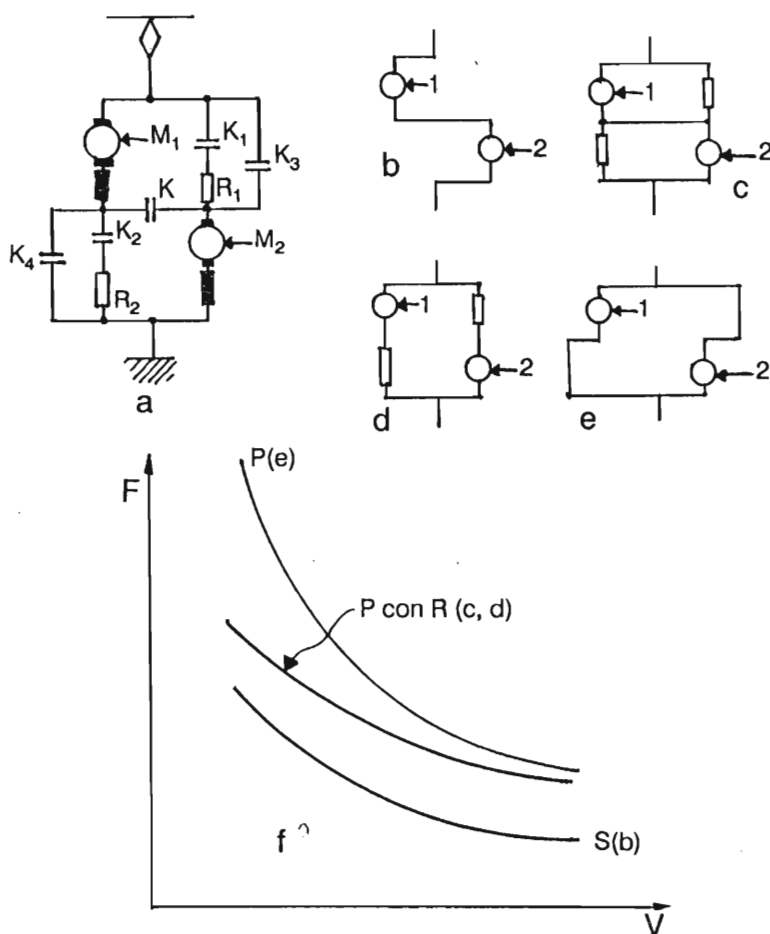


Fig. 3.22 Diagrama presentando el método de paso de serie a paralelo por puente; a - circuito de fuerza; b,c,d,e - secuencia de conexión; f - curvas de operación.

- En paralelo con cada motor se conecta una resistencia.
- Si la tensión de línea queda constante, la corriente de los motores queda prácticamente igual que antes de esta maniobra.
- En los motores circula la corriente I_1 y en el puente circulará la corriente $I_1 - I_2$ (a través del contacto K).
- Se puede diseñar una resistencia tal que I_1 sea aproximadamente igual a I_2 .

La siguiente etapa es desconectar el puente, después de lo cual sigue la eliminación de las resistencias, los motores quedando en paralelo.

Se aprecia que el paso de la conexión serie a la conexión en paralelo (abrir el contactor K), se produce sin un shock de corriente.

Este método resulta más desventajoso con respecto al primero, debido a que requiere de un número mayor de contactores.

Otra desventaja la constituye la colocación asimétrica del réostato, con respecto a la línea. (La eliminación del réostato se realiza por pasos).

El método puente se utiliza, por lo general, para motores de menor capacidad (tranvía, metro), presentando la ventaja de un menor shock de corriente.

3.3.1.3 La característica $V(I)$ para varias tensiones aplicadas al motor

Conociendo la característica $V(I)$, de un motor serie, para la tensión nominal U , se puede clacular y construir gráficamente la característica $V_1(I)$ para cualquier otra tensión U_1 , de conformidad con la relación 3.61, considerando $R=0$.

Para la tensión U_1 resulta:

$$V_1 = \frac{U_1 - rI}{K\phi}$$

y haciendo la relación, resulta:

$$V_1 = V \left(\frac{U_1 - rI}{U - rI} \right) \quad (3.62)$$

De la relación 3.62 dando valores a la corriente I se puede calcular, por puntos, la nueva característica.

Como $rI \ll U$, se puede usar la relación aproximada:

$$v_1 = V \cdot \frac{U_1}{U} \quad (3.63)$$

o sea, la ordenada de V_1 , para una I determinada, se encuentra multiplicando la ordenada de V por la relación de las tensiones U_1/U .

En el caso de una locomotora sobre la cual se realizan las conexiones serie, serie paralelo y paralelo, conociendo $V(I)$ para U nominal, se puede encontrar las otras dos características $V(I)$, multiplicando las ordenadas de la característica nominal por los valores 0.5, respectivamente 0.25.

En la figura 3.23 se muestran estas características $V(I)$, a manera de ejemplo. Estas características combinadas con la característica $M(I)$, la cual es única para un motor, se transforman en tres características $F(V)$. La forma aproximada de estas curvas se puede apreciar en la figura 3.24.

3.3.2 Regulación de velocidad con la variación del flujo inductor

La reducción del flujo inductor, en un motor serie, se realiza desviando por otra vía, parte de la corriente de armadura.

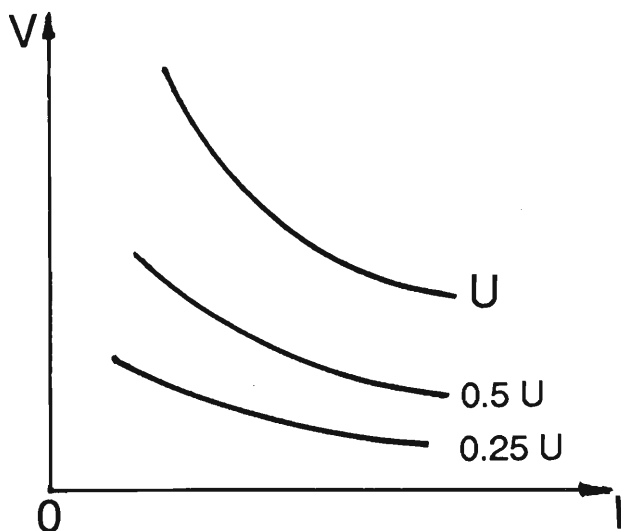


Fig. 3.23 Características $V(I)$ para las conexiones serie (0.25U), serie-paralelo (0.5U) y paralelo (U).

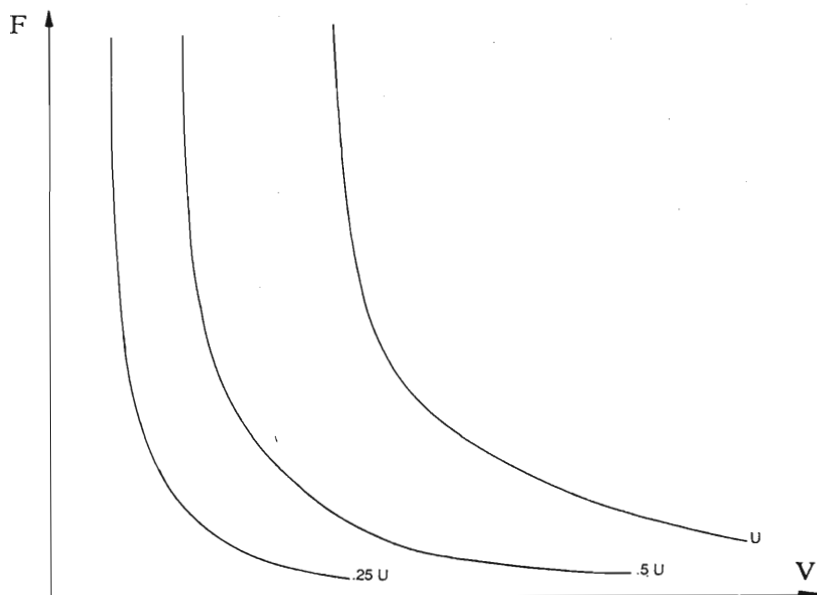


Fig. 3.24 Característica $F(V)$ para las conexiones serie (.25), serie-paralelo (.5U) y paralelo (U).

Si notamos con AV_r las ampervueltas reducidas y con AV_n las ampervueltas normales (con toda la corriente a través de la bobina de campo), podemos definir la siguiente relación:

$$\beta = \frac{AV_r}{AV_n} \quad (3.64)$$

Este coeficiente se llama coeficiente de reducción del campo y se expresa en porcentaje (%). Por lo general, no es el mismo que la disminución del campo, debido al fenómeno de saturación. En la práctica la disminución del campo se cuantifica a través de la reducción de las ampervueltas y se realiza por los siguientes métodos:

- Seccionamiento del devanado.
- Desviación de una parte de la corriente por una resistencia (shunt resistivo).
- Desviación de una parte de la corriente a través de una resistencia enseriada con una inductancia (shunt inductivo).

3.3.2.1 La reducción del campo con seccionamiento del devanado

En la figura 3.25 se presenta esquemáticamente éste método. Cuando el contactor K_1 está cerrado y K_2 está abierto, tenemos AV_n . Cuando K_1 está abierto y K_2 está cerrado, tenemos AV_r , resulta:

$$\beta = \frac{AV_r}{AV_n} = \frac{I \cdot w_1}{I \cdot w} = \frac{w_1}{w} \quad (3.65)$$

Este método no permite la eliminación del contacto K_1 , cortocircuitando las espiras w_2 , debido a que en los periodos transitorios las espiras w_2 , en cortocircuito, se comportarían como el secundario de un transformador, el cual anularía el campo producido por w_1 dejando momentáneamente el motor con un campo demasiado bajo, fenómeno que empeoraría mucho su conmutación.

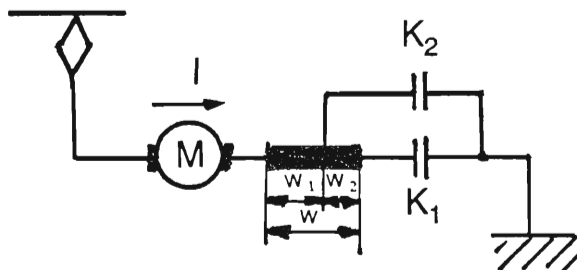


Fig. 3.25 Diagrama mostrando el método de reducción del campo mediante el seccionamiento del devanado de excitación.

En sí, este método no es muy práctico, debido a que se requiere sacar derivaciones del devanado de excitación, lo que complica la construcción del motor.

3.3.2.2 La reducción del campo desviando parte de la corriente a través de una resistencia

Como resulta del mismo título, este método supone la ejecución de un shunt resistivo sobre el devanado de excitación como se muestra en la figura 3.26a.

Se puede escribir:

$$I_e = I - I_{sh} \quad (3.66)$$

$$\beta = \frac{I_e}{I} = \frac{r_{sh}}{r_e + r_{sh}} \quad (3.67)$$

En la figura 3.26b se presentan dos niveles de disminución de flujo:

- el primer nivel (K_1 cerrado, K_2 abierto).

$$\beta_1 = \frac{r'_{sh} + r''_{sh}}{r_e + r'_{sh} + r''_{sh}} \quad (3.68)$$

- el segundo nivel (K_1 y K_2 cerrados).

$$\beta_2 = \frac{r''_{sh}}{r_e + r''_{sh}} \quad (3.69)$$

Se aprecia que: $\beta_1 > \beta_2$

Este método tiene aplicación práctica, pero presenta una gran deficiencia. Cuando se presentan los fenómenos transitorios (se desprende el pantógrafo de la catenaria), la corriente a través de la ar-

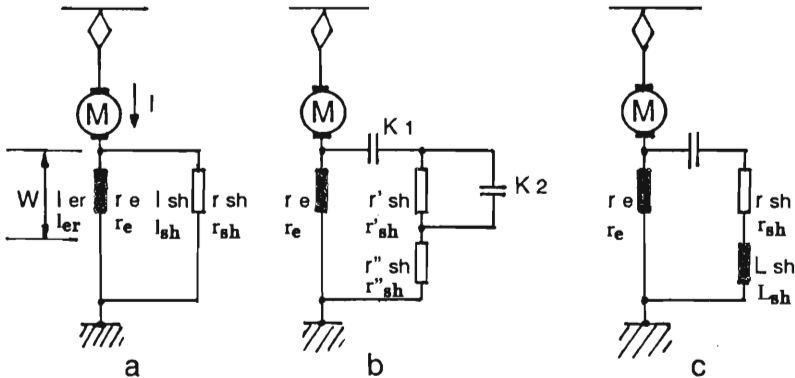


Fig. 3.26 Diagramas para reducción del campo, desviando parcialmente la corriente de armadura; a- Un nivel con shunt resistivo; b- Dos niveles con shunt resistivo; c- shunt inductivo.

madura puede tomar valores grandes, mientras que en el devanado de excitación, la corriente se establece más tarde, debido a la inductancia de la bobina del campo. Esto conduce a un empeoramiento de la conmutación, como ya se mencionó anteriormente.

3.3.2.3 La reducción del campo a través del shunt inductivo

Este método consta en desviar una parte de la corriente a través de una resistencia enseriada con una inductancia, como se ve en la figura 3.26c. El comportamiento de las dos ramas en paralelo es similar, en cuanto a fenómenos transitorios se refiere, eliminando así los problemas presentados en el método anterior.

Para este circuito se puede escribir:

$$I_e \cdot r_e + L_e \frac{d(I_e)}{dt} = I_{sh} \cdot r_{sh} + L_{sh} \frac{d(I_{sh})}{dt} \quad (3.70)$$

Haciendo uso de las notaciones anteriores y algunas transformaciones, resulta:

$$\beta \cdot I_e + \beta \cdot L_e \frac{d(I)}{dt} = (1 - \beta) \cdot I \cdot r_{sh} + (1 - \beta) \cdot L_{sh} \frac{d(I_{sh})}{dt} \quad (3.71)$$

Igualando los términos resistivos, respectivamente los términos inductivos, resulta:

$$r_{sh} = \frac{\beta}{1 - \beta} \cdot r_e \quad (3.72)$$

respectivamente:

$$L_{sh} = \frac{\beta}{1 - \beta} \cdot L_e \quad (3.73)$$

Utilizando estas relaciones, se puede calcular r_{sh} y L_{sh} . Se debe tomar en cuenta el fenómeno de saturación del circuito magnético de la máquina.

El shunt inductivo calculado para un determinado β , ya no satisface para otro β_1 . Resultaría necesaria una variación del número de vueltas de la inductancia L_{sh} , pero en la práctica se coloca una inductancia L_{sh} máxima para un β mínima.

Cuando ocurren los fenómenos transitorios, la corriente en el devanado de excitación puede variar más rápidamente que en el shunt, que, al contrario con la pérdida del flujo, está forzando el flujo inductor, evitando problemas de conmutación.

Aunque este método es más complejo e implica la utilización de equipo más sofisticado, se usa normalmente sobre las locomotoras.

3.3.2.4 Características del motor serie con campo disminuido

La característica de un motor serie con campo disminuido se construye a partir de la característica nominal del motor, de conformidad con la relación 3.61. La disminución del campo significa tener un flujo ϕ_1 diferente al ϕ nominal.

Recordando la relación 3.64 y suponiendo que estamos fuera de la zona de saturación se puede escribir:

$$\beta = \frac{AV_r}{AV_h} \cong \frac{\phi_1}{\phi} \quad (3.74)$$

Si consideramos nuevamente que $rI \ll U$ encontramos una relación similar a la 3.63, aplicada a los flujos, o sea:

$$V_1 = V \cdot \frac{\phi}{\phi_1} \cong \frac{V}{\beta} \quad (3.75)$$

Esta característica se construye punto por punto, como se aprecia en la figura 3.27. En esta figura se supuso conocida la característica $V(I)$. Para un valor de β determinado, se escogieron tres puntos arbitrariamente A_1 , A_2 y A_3 , los cuales corresponden a las corrientes I_1 , I_2 , I_3 y a las velocidades V_1 , V_2 , V_3 .

Con la ayuda de β se determinaron los puntos A'_1 , A'_2 y A'_3 correspondientes a la característica de campo reducido.

De manera semejante se traza la característica $F''(I)$, de campo reducido, conociendo la característica $F(I)$, haciendo uso de las relaciones 3.20 y 3.74.

Se puede decir que:

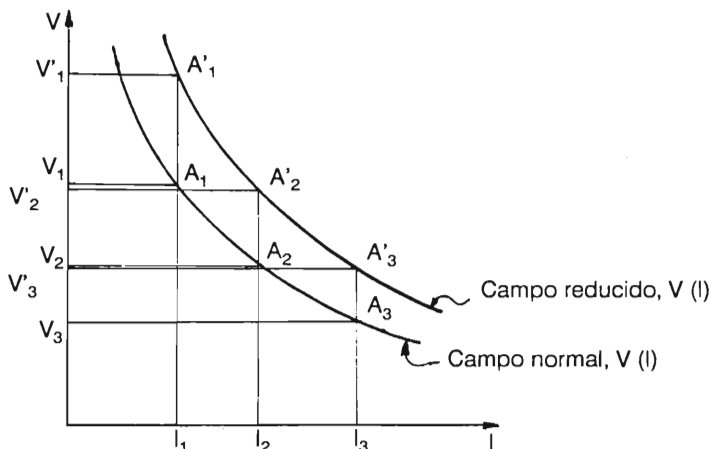


Fig. 3.27 Construcción gráfica de la característica $V(I)$ de campo reducido, partiendo de la característica nominal $V(I)$.

$$F_1 = \beta F \quad (3.76)$$

para la misma corriente de armadura.

En la figura 3.28 se puede apreciar la construcción gráfica de la curva $F'(I)$, partiendo de la característica $F(I)$ para un valor de β determinado.

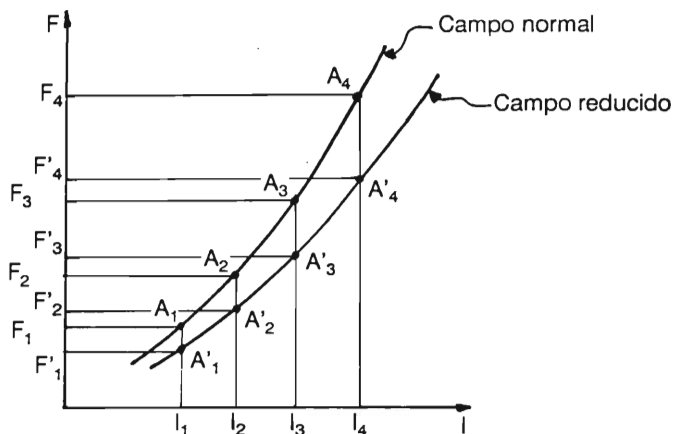


Fig. 3.28 Característica $F(I)$ para campo normal y campo reducido.

Combinando las dos características anteriores, se deduce la curva $F'(V)$, (similar al párrafo 3.2.5.7.). La característica $F'(V)$ queda arriba de la característica $F(V)$, como se puede apreciar en la figura 3.29.

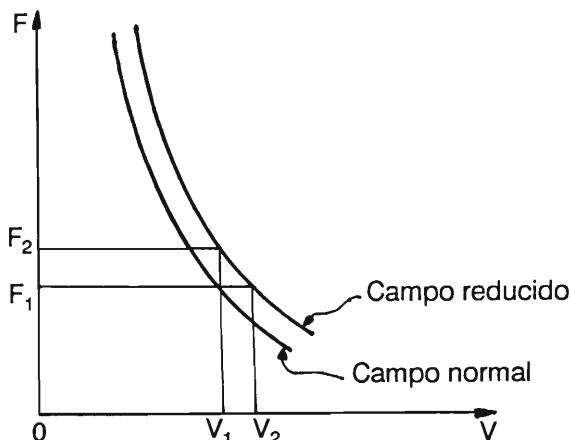


Fig. 3.29 Características $F(V)$ para campo nominal y campo reducido.

Se podría creer que utilizando la disminución del campo, la potencia del motor aumenta. En realidad nos desplazamos sobre sus características hacia límites superiores del punto de vista electromagnético, sabiendo que la capacidad del motor está limitada del punto de vista térmico, o de este punto de vista, la potencia del motor sobre las coordenadas FV aparecen como una hipérbola ($F \times V = \text{constante}$). En la figura 3.30 se presentan tres curvas. Una representa $F(V)$ con la excitación completa; otra, la misma característica, pero para un campo reducido al mínimo (que permite el motor) y por último, se presenta la potencia del motor de punto de vista de su capacidad térmica. ($F \times V = \text{constante}$).

Para utilizar la capacidad motriz de la locomotora en una zona lo más amplia posible, en el plano $F-V$, para cada conexión de los motores, se debe practicar reducciones del flujo, hasta los límites constructivos aceptables, para obtener una zona entre las dos características $F'(V)$ y $F(V)$ ancha. (La región hachurada en la figura 3.30).

Esta zona define lo que llamamos “factor de flexibilidad” y su interpretación resulta de la misma figura.

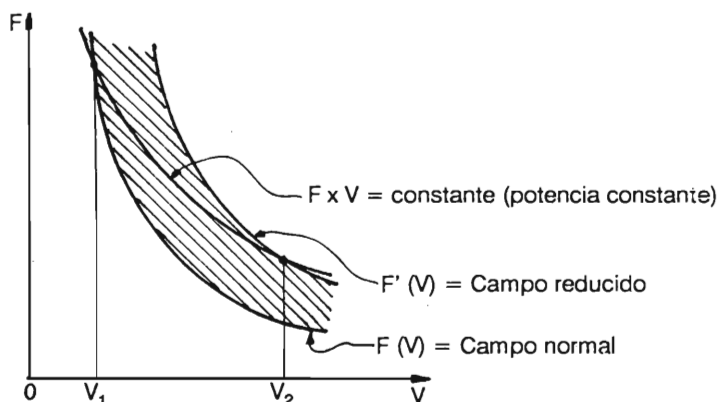


Fig. 3.30 La capacidad de utilización de una locomotora con reducción de campo.

Se puede observar que el motor trabaja a su capacidad térmica, para la velocidad V_1 , sobre la característica $F(V)$ y para la velocidad V_2 , sobre la característica $F'(V)$.

La relación V_2/V_1 determina el factor de flexibilidad. (La relación entre las velocidades extremas sobre la curva de potencia nominal).

En las locomotoras clásicas (más antiguas), este coeficiente era del orden de 1.3. En la actualidad, para algunas máquinas recientes, se llega a valores de 2.3. La reducción del flujo alcanza porcentajes del orden de 25% del flujo nominal.

Además de las ventajas presentadas, la reducción del campo implica algunas desventajas, en primer término el empeoramiento de la conmutación. Como consecuencia se presenta el deterioro de partes como: colector, portaescobillas, aislamiento. Estas deficiencias suponen complicaciones constructivas para el motor como: preveer devanado de compensación, reducir la velocidad periférica del colector, el shunt del devanado debe ser de tipo inductivo, etc.

3.3.3 Regulación reostática de velocidad

Partiendo de la ecuación 3.61 considerando las variables de la locomotora se puede escribir:

$$V_1 = V \frac{U - (r + R)I}{U - rI} \quad (3.77)$$

o sea, si se conecta una resistencia en serie con el motor, para la misma corriente, resulta una velocidad menor.

En la figura 3.31 se aprecia que las características $V(I)$, considerando una resistencia enseriada con el motor, está por debajo de la característica $V(I)$ sin resistencia enseriada.

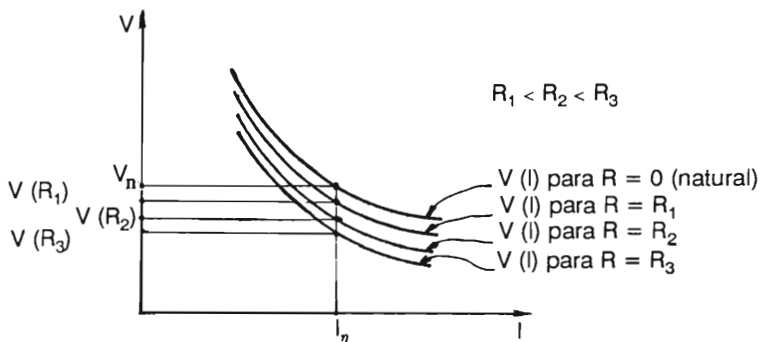


Fig. 3.31 Características $V(I)$ con resistencias introducidas en el circuito.

En realidad la reducción de velocidad se debe a una reducción de tensión en las terminales del motor, debido a la caída de tensión sobre el reóstato.

$$U_{motor} = U - RI \quad (3.78)$$

Combinando las características $V(I)$ y $R(I)$ se obtienen las características $F(V)$ para cada paso del reóstato.

3.3.4 El ensamble de las características de tracción

Combinando los tres métodos de variación de velocidad ya descritos, se deduce el ensamble de las características de tracción, como se muestra en la figura 3.32.

Las tres maneras de conexión; serie (s), serie paralelo (s-p) y paralelo (p) corresponden al circuito de fuerza mostrado en la figura 3.2 y al diagrama de la conexión, figura 3.3. Para cada tipo de conexión base resulta:

- Una característica de tracción con el campo completo, dibujado con línea llena.

- Dos características con el campo reducido que se obtienen con la desviación de la corriente (shunt), dibujada con línea pausada.

- Un número variable de características reostáticas, dibujadas con línea y punto.

Los primeros dos tipos de características se llaman de tipo económico, mientras que el último tipo se llama no económico. La razón de este último tipo es para limitar la corriente, cuando se ejecuta la transición entre los distintos tipos de conexión.

La no economía del tipo resistivo, se explica fácilmente por el fenómeno de pérdida de energía sobre una resistencia que, además tenemos que enfriar.

El conductor está instruido para pasar lo más rápido posible sobre estas características, para operar sobre una de las características económicas.

El dominio de utilización de las características de tracción está limitado por los siguientes factores:

- La característica de campo reducido al máximo en la conexión en paralelo.

- Potencia térmica del motor (horaria).

- Fuerza adherente de la locomotora.

- Corriente máxima admitida por las instalaciones y la locomotora.

- Velocidad máxima admitida por la locomotora.

Algunos de estos máximos se dibujaron sombreados en la figura 3.32.

3.3.5 Relación de transmisión de los engranes

Con el fin de realizar locomotoras más versátiles se puede variar, mecánicamente, la relación en los engranes, que transmiten el par motor hacia la vía. (Ver fig. 2.1).

Con la misma característica $M(n)$ del motor, se puede lograr distintas características $F(V)$ para la locomotora. Se hace uso de una transformación mecánica, obvia. (Ver relaciones 3.33 y 3.34).

El punto de operación se desplaza sobre una hipérbola, de potencia equivalente, en el plano $F-V$.

La versatilidad de la locomotora consta en que ella misma se puede emplear para trenes rápidos y ligeros (F menor y V mayor) así como para trenes mercantiles (F mayor y V menor), o para maniobras.

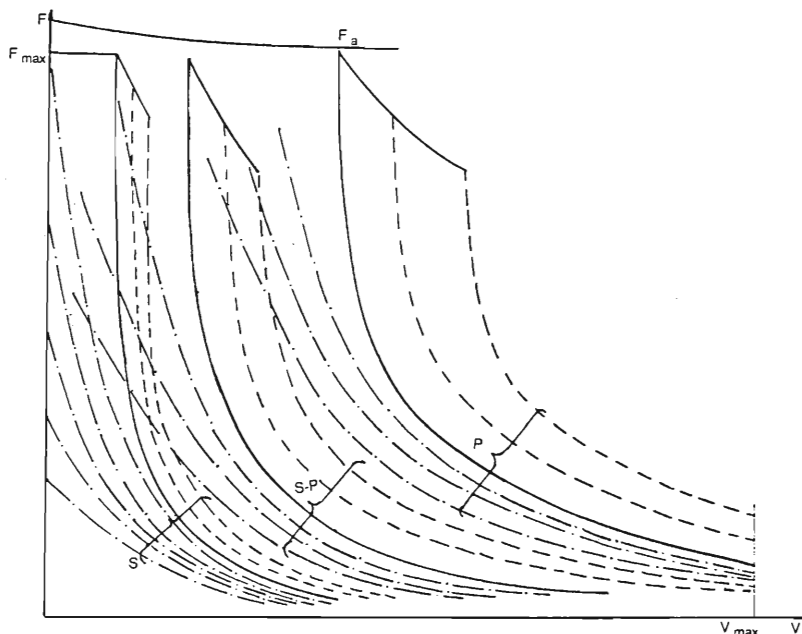


Fig. 3.32 Ensemble de las características de tracción de una locomotora de corriente directa.

3.4 Arranque y maniobras

Definimos arranque, el proceso de aumentar la velocidad desde cero, hasta que se entra a algún valor, sobre la característica nominal de operación.

Se necesita limitar la corriente de arranque a un valor máximo aceptable (sea por limitación de la fuerza, sea por la limitación de la aceleración, sea por la limitación de la corriente en sí).

Sobre la característica natural con campo completo, en la figura 3.33, al valor de I máximo le corresponde el valor V_e , que nombramos valor de entrada.

De conformidad con la ecuación 3,61, para la velocidad $V=0$, corresponde una resistencia:

$$R = \frac{U}{I_{max}} - r \quad (3.79)$$

Si queremos mantener la fuerza de tracción constante en el periodo de arranque, tendríamos que mantener $I_{\max} = \text{constante}$.

Se ve en la ecuación 3.61 que para mantener I_{\max} - constante, como V es variable, resultaría que R debería ser variable, o sea, para $V=0$, $R=R_{\max}$ y para $V=V_e$, $R=0$.

El proceso de eliminación de la resistencia R de manera continua es prácticamente imposible, debido a que se manejan corrientes muy grandes.

La eliminación de la resistencia R se realiza escalonadamente, haciendo que la corriente (e implícitamente la fuerza de tracción) varía entre el valor I máximo, ya establecido y un valor I mínimo, que se establece de antemano.

Con los valores I_{\max} , e I_{\min} , se puede asignar un valor promedio a la corriente (ver fig. 3.33), de la siguiente manera:

$$I_{\text{prom}} = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} \quad (3.80)$$

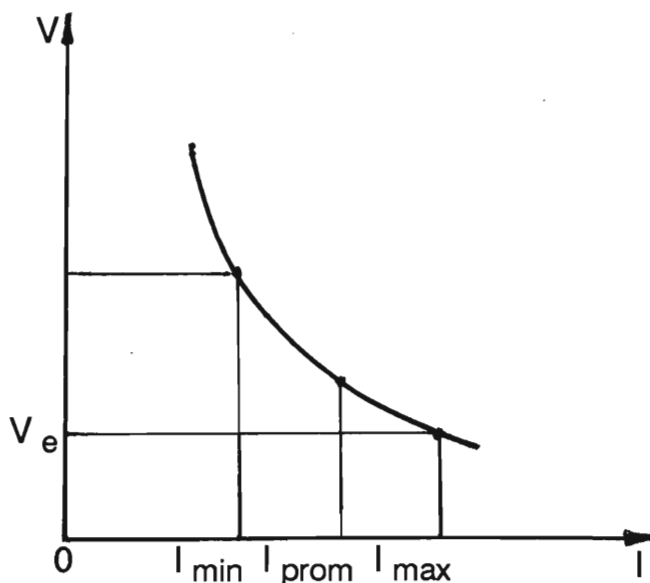


Fig. 3.33 Característica $V(I)$.

Teniendo los valores I_{max} , I_{min} , e I promedio para la corriente, implica tener F_{max} , F_{min} , y F prom para la fuerza tractiva respectivamente a max , a min , y a promedio para la aceleración.

La calidad del arranque se caracteriza por los coeficientes de oscilación de corriente (K_i), de fuerza tractiva (K_f) y de aceleración (K_a), definidos como sigue:

$$K_i = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (3.81)$$

$$K_f = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_{max} + F_{min}} \quad (3.82)$$

$$K_a = \frac{a_{max} - a_{min}}{a_{max} + a_{min}} \quad (3.83)$$

Donde:

$$a = \frac{d(V)}{dt}$$

Se demuestra que el coeficiente de aceleración es mayor que el coeficiente de fuerza y de corriente y que, además existe la desigualdad:

$$K_a > K_f > K_i \quad (3.84)$$

F_{max} , está limitada por la adherencia de la locomotora y a max por la calidad del arranque.

Por otro lado, para mantener una calidad del arranque elevada, se necesitaría un promedio de fuerza

$$F_{prom} = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} \quad (3.85)$$

lo más alto posible, o sea F_{prom} muy cerca de F_{max} . Con otras palabras F_{min} , muy cerca de F_{max} implicando un número muy grande de pasos en la resistencia de arranque R . Esto implica

una resistencia complicada, muchos contactores y materiales de conexión.

Prácticamente se consideran satisfactorios los siguientes valores:

$F_{\max} = (1.1 \text{ a } 1.2) F_{\min}$ - para locomotoras

$F_{\max} = (1.15 \text{ a } 1.3) F_{\min}$ - para trenes automotores.

Estas condiciones de fuerza conducen a unas oscilaciones de corriente de: $I_{\max} = (1.11 \text{ a } 1.18) I_{\min}$.

Esencialmente el cálculo del arranque de la locomotora consiste en determinar el número de pasos de la resistencia y el valor de cada paso, en las condiciones impuestas de la variación de la corriente.

El valor de la resistencia depende de los parámetros del motor, de la tensión aplicada, del número de los motores y del diagrama de conexión. El cálculo se hace para un solo motor y para cada tipo de conexión (se empieza, por lo general, con la conexión serie).

3.4.1 El método grafo - analítico para el cálculo del reóstato

En la figura 3.34 se presente la curva $V(I)$ para una conexión dada. Fijamos sobre el dibujo los valores I_{\max} e I_{\min} ya establecidos.

Supongamos que podemos variar la resistencia, en el periodo de arranque de tal manera que $I_{\max} = \text{constante}$. Entonces $\phi = \text{constante}$. La ecuación del motor se puede escribir.

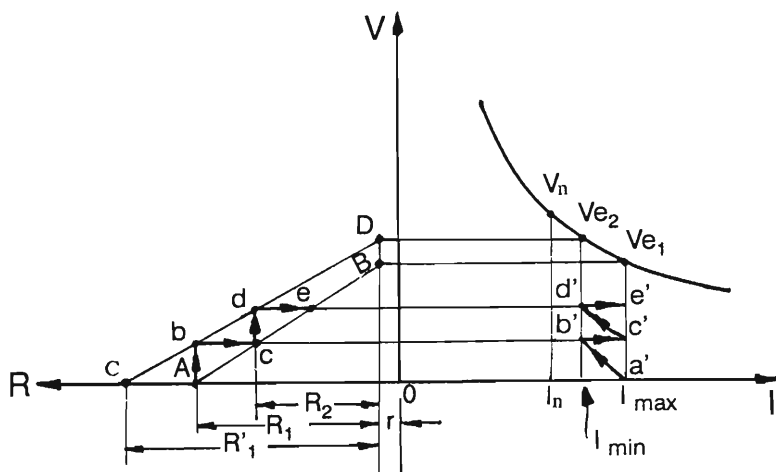


Fig. 3.34 Cálculo grafoanalítico del reóstato para arranque.

$$U = K\phi V + (r + R)I_{max} = KV + (r + R_1)I_{max} \quad (3.86)$$

o sea, resulta una función lineal $R(V)$, la cual en el plano, representa una recta.

En el lado izquierdo de la figura 3.34 presentamos la función $R(V)$.

Hacemos la misma suposición para I_{min} . Es decir:

$$U = KV + (r + R'_1)I_{min}. \quad (3.87)$$

Para el valor de I_{max} , resulta la recta AB y para el valor de I_{min} , resulta la recta C.D. Las coordenadas de sus puntos extremos son las siguientes:

$$\begin{aligned} A(R_1 + r, 0) \\ B(r, V_{e1}) \\ C(R'_1 + r, 0) \\ D(r, V_{e2}) \end{aligned} \quad (3.88)$$

Al arranque, en realidad tenemos R_1 en el circuito, resultando la corriente de arranque I_{max} , para $V=0$.

A medida que la velocidad aumenta, la corriente disminuye, hasta alcanzar el valor de I_{min} . En la figura 3.34 sobre la característica $R(V)$ nos desplazamos del punto A hacia b y en el plano $V(I)$, sobre una característica a'b' que corresponde al motor, con R_1 en el circuito. En ese punto se produce la eliminación de un paso de la resistencia, o sea, pasamos de R_1 a R_2 . Esto se produce de manera instantánea. En el plano $R(V)$ nos desplazamos del punto b al punto c y en el plano $V(I)$, del punto b' al punto c'. El valor de la corriente pasa de I_{min} a I_{max} y pasamos a operar sobre la característica del motor con R_2 en el circuito (curva c'd').

Así sucesivamente, hasta que se elimina el último paso de resistencia, quedando solamente r y entrando sobre la característica nominal con la velocidad V_{e1} , correspondiente a la corriente I_{max} .

El punto de operación se desplaza a través de V_{e2} , hasta el punto V_n de operación estable.

El método gráfico de cálculo del arranque, consta en encontrar las características de arranque ($a'b'$, $c'd'$, etc), y cerrar de tal manera el último paso, para entrar sobre la característica natural con la corriente I_{\max} . En el caso que, eliminando el último paso de resistencia, sobre la gráfica, corresponda a un valor menor que I_{\max} , se puede hacer un reajuste, disminuyendo la diferencia entre I_{\max} e I_{\min} , (disminuyendo el primero o aumentando el segundo ligeramente), hasta que la gráfica cierra aceptablemente.

El cálculo del reóstato, de la manera expuesta, se efectúa para cada tipo de conexión de motores (serie, serie paralelo y paralelo).

El reóstato es uno solo, de manera que sus secciones deberán combinarse para satisfacer todas las combinaciones necesarias en el arranque de la locomotora.

3.4.2 Reóstato para maniobras

Al conectar los motores en serie, la condición de arranque, supone que la locomotora desarrolla una fuerza motriz F_{\max} .

En el caso de maniobras, cuando la locomotora tiene que moverse sola, esta fuerza puede provocar una aceleración demasiado alta.

Para corregir esto, se tiene que limitar la corriente a través de unos pasos de resistencia suplementarios, nombrados de maniobras.

En el caso que la locomotora arranca sola, se acostumbra una aceleración de $0.4 \dots 0.6 \text{ m/s}^2$. El número de los pasos de maniobras se toma entre 4 y 6, dividiendo el rango $I_n - I_{\min}$ y utilizando la ley de Ohm.

3.4.3 Cálculo térmico del reóstato

Conociendo los valores Ohmicos de los pasos del reóstato, se puede constituir el circuito de fuerza de la locomotora (fig. 3.2.).

El reóstato está constituido por elementos de resistencia, sea de acero colado, con contenido de silicio (construcción pesada, con una constante térmica bastante grande), sea por elementos de cinta metálica de aceros especiales, (construcción ligera, con una constante térmica reducida).

Para ejecutar el cálculo térmico, se requiere la corriente efectiva I_{ef} , la cual está atravesando el elemento resistivo y el tiempo t , que dicha corriente persiste.

Si al arranque, un elemento de resistencia interviene n veces en el circuito, en el cálculo se toma el promedio cuadrático con los tiempos, o sea:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots I_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots t_n}} \quad (3.89)$$

Donde:

$t_1, t_2 \dots t_n$ = tiempo de persistencia de cada corriente.

$I_1, I_2 \dots I_n$ = corrientes manejadas por el elemento de resistencia.

De las anteriores se desprende que, la corriente varía entre los límites I max e I min.

En estos casos se toma el valor promedio.

$$I_{prom} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$$

Con la corriente efectiva y en función de la superficie de disipación, respectivamente la eficiencia del enfriamiento, se determina la sección del elemento resistivo. (Existen tablas y gráficas de los fabricantes).

3.4.4 El consumo de energía en el reóstato de arranque

El cambio de la conexión entre los motores (serie, serie-paralelo, etc), resulta como una necesidad de la regulación de velocidad.

Se demuestra que estas interconexiones conducen a una reducción en el consumo de energía.

Para simplificar las cosas, se consideran dos motores conectados en serie, respectivamente en paralelo, con un reóstato que se elimina uniformemente en el tiempo T, a una corriente constante.

En la figura 3.35 se presente la potencia en las ordenadas y el tiempo en las abscisas.

En el caso del arranque en paralelo, el consumo de energía total sería:

$$W_p = 2U I_a T \quad (3.90)$$

considerando los dos motores.

Conforme a la relación 3.61 si ϕ = constante, para una I_a = constante y despreciando el término $r I_a$, resulta:

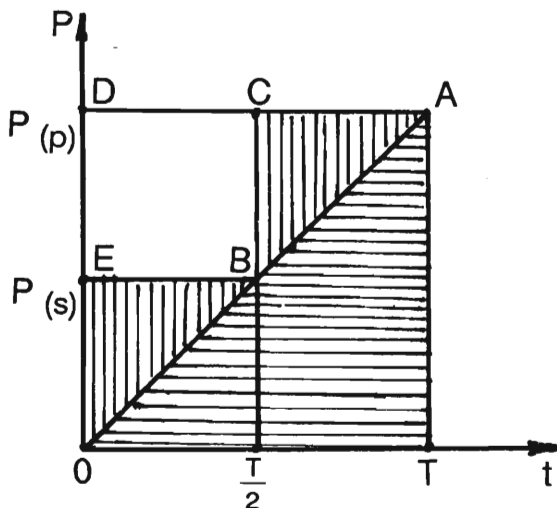


Fig. 3.35 El consumo de energía para dos motores, arranque serie y paralelo.

$$U = KV + RI_a \quad (3.91)$$

o sea, una variación lineal de la tensión contra electromotriz, que representa el aprovechamiento útil de la tensión.

Sobre la gráfica de la figura 3.35, la superficie OAT, con hachura horizontal representa la potencia útil (en los motores), mientras que la superficie OAD representa la energía disipada en el reóstato.

En el caso de arranque serie-paralelo se conecta serie hasta el tiempo $T/2$, y después en paralelo. Para el primer período $T/2$, el consumo de energía será:

$$W_{(s)} = 2 \frac{U}{2} I_a \frac{T}{2} \quad (3.92)$$

de la cual, en la gráfica corresponde la superficie OBE a la energía consumida en el reóstato y la superficie $OB \frac{T}{2}$ a la energía útil.

Al momento $T/2$ se produce el cambio a la conexión paralelo y de ese momento en adelante hasta T , la energía disipada en el reóstato será representada por la superficie ABC y la energía útil, por la superficie $\frac{T}{2}BAT$.

La diferencia de consumo de energía en el reóstato, en el arranque paralelo y serie-paralelo, corresponde a la superficie BCDE representando aproximadamente el doble de la disipación en la conexión paralelo, con respecto a la conexión serie-paralelo.

Si consideramos el caso de varios motores conectados en serie, serie-paralelo y paralelo, en los respectivos tiempos $T/4$; $T/2$ y T , la economía de energía se aprecia en la figura 3.36, con la misma simbología.

Se puede decir que el método de arranque con cambio de conexiones, pasando por serie, serie-paralelo y paralelo, para las locomotoras de corriente directa, ofrece la posibilidad de reducir las tensiones aplicadas a las terminales de los motores, de los cuales resultan las características $F(V)$ respectivas, pero está impuesta también, del punto de vista de la disipación (pérdida) mínima de energía en el reóstato de arranque.

3.5 Servicios auxiliares

Además de la fuerza motriz, la locomotora debe proporcionar, de manera incondicional, las siguientes funciones:

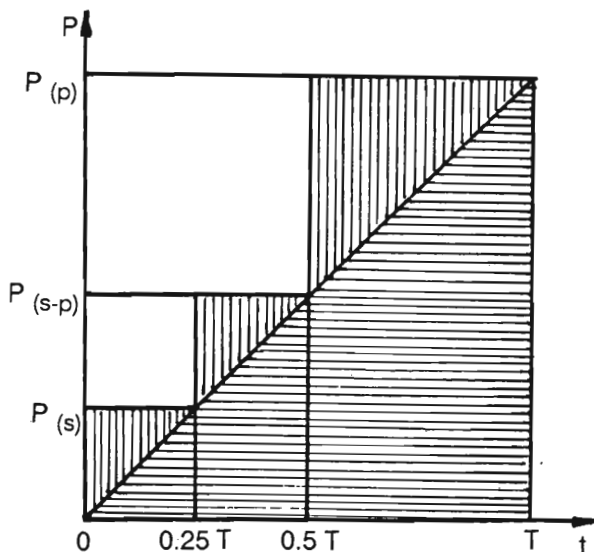


Fig. 3.36 El consumo de energía para arranque serie, serie-paralelo y paralelo.

- Aire comprimido
- Ventilación de los motores principales y reóstato.
- Acondicionamiento del aire.
- Alimentación de los circuitos de control y servicios propios.

3.5.1 Diagrama eléctrico de los servicios auxiliares

En la figura 3.37 se presenta un diagrama de principio, de los servicios auxiliares, requeridos de una locomotora de corriente directa, de 3000 o 1500 V.

Todos los motores eléctricos, son de tipo serie y expuestos a trabajar con la tensión nominal (3 KV o 1.5 KV), lo que constituye una desventaja para este tipo de electrificación.

Cada circuito está provisto de un contactor K y una protección de tipo fusible F.

Los motores de menor potencia están provistos a trabajar en serie con una resistencia R conectada permanentemente.

La caída de tensión sobre esta resistencia, en operación normal, no rebasa el 3...5% de la tensión nominal, cosa que no perjudica su operación, pero lo protege al arranque.

Se aplica este método para los motores menores de 20 KW. Los motores mayores **se** conectan en serie con dos resistencias, de las cuales una se **queda** conectada permanentemente, mientras que la otra se elimina **después** del arranque.

3.5.2 Grupo motor-ventilador (M-V)

Un grupo motor-ventilador está constituido normalmente de un motor que mueve dos ventiladores centrifugales; uno de cada lado de la flecha. se necesitan varios equipos similares y se conectan por grupos de dos motores en serie.

El aire está tomado de la atmósfera por la parte superior, a través de un filtro y manejado a través de ductos hacia los motores principales y hacia las resistencias de arranque y freno, equipos que requieren de enfriamiento forzado.

El cálculo de la potencia requerida del motor del ventilador se realiza con la siguiente relación:

$$P = \frac{Q \cdot H}{102\eta} (KW) \quad (3.93)$$

En donde:

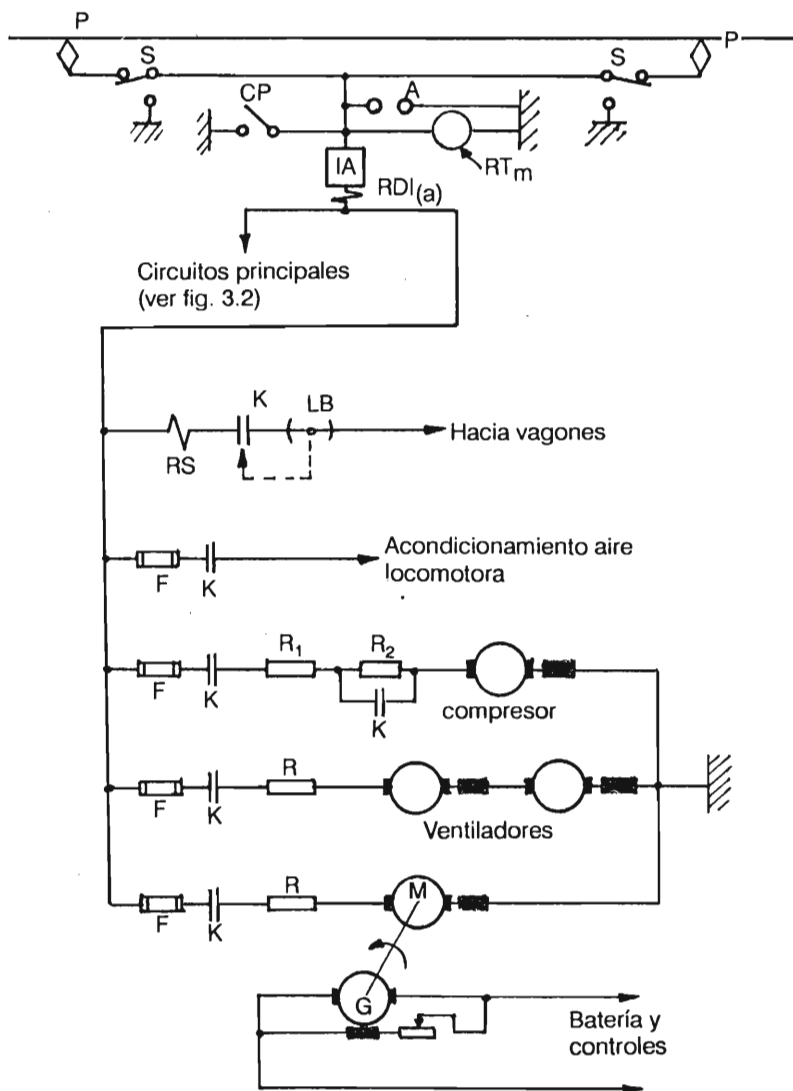


Fig. 3.37 Diagrama de alimentación de los servicios auxiliares.

η = eficiencia del ventilador, con valores de 0.4..a..0.55

$$Q = K(mQ_1 + Q_2) (m^3/s) \quad (3.94)$$

Q_1 = el aire requerido para el enfriamiento de un solo motor principal (normalmente $Q_1=70..a..100m^3/min.$)

m = número de motores principales.

Q_2 = el aire requerido para el enfriamiento de las resistencias

K = coeficiente de pérdidas (1.15 ..a..1.20).

H = presión total del ventilador en mm columna de agua, calculada con:

$$H = H_{st} + H_{din}(mmH_2O) \quad (3.95)$$

H_{st} = presión estática, (mm H_2O)

H_{din} = presión dinámica, (mm H_2O)

La presión estática es la diferencia de presión que se debe crear, para que exista la circulación del aire y la presión dinámica es la pérdida de presión en los ductos, la cual depende de varios factores, entre los que notamos velocidad del aire, forma de ductos, rugosidad, etc.

La potencia de los motores de los ventiladores se sitúa entre 10 y 15 KW.

Existen tipos de enfriamiento automatizados, en los cuales la circulación del aire se establece automáticamente en función del uso, o de la temperatura de la resistencia.

3.5.3 Grupo motor compresor (M-C)

El aire comprimido se requiere para el freno y para realizar algunos mandos electro-neumáticos.

Por lo general se requiere del aire comprimido bajo las siguientes características:

- 2500.....3000 1/min a la presión de 8...a...10 kg/cm², para locomotoras.

- Hasta 700 1/min a la presión de 7...a...8 kg/cm² para trenes automotores.

- Hasta 400 1/min. a la presión de 5...a..7 kg/cm² para tranvías.

El control de arranque y paro del compresor se ejecuta automáticamente, con interruptores de presión, debidamente calibrados.

La potencia requerida para el compresor se calcula de manera aproximada con la siguiente relación empírica:

$$P = 0.8..a..1.1KW \quad (3.96)$$

para 1 m^3 /min, a la presión de 1 kgf/cm^2 .

3.5.4 Grupo convertidor (M-G)

Este grupo se emplea para disponer de una fuente de tensión constante, tanto para la señalización y control, como para cargar el banco de baterías.

El generador de C.D. tiene un regulador automático para el campo, para que el voltaje de salida no dependa de la velocidad del motor, la cual varía en función del voltaje de la catenaria que, como sabemos, es variable.

En las construcciones recientes se puede prescindir de éste equipo, a cambio de otro, a base de semiconductores (estado sólido).

3.5.5 Acondicionamiento del aire

En los países de climas inhóspitos resulta inherente la calefacción, la cual se ejecutaba anteriormente con elementos de calefacción directa, colocados en los compartimientos y pasillos. En las construcciones modernas, esto se realiza en unidades paquete por cada vagón, acondicionando el aire en temperatura, humedad y filtración.

La locomotora dispone de enchufes especiales, para conectarse a los vagones, los cuales disponen también de dichos enchufes, en los dos lados.

Estos enchufes, en los dos lados, se operan con bloqueos y llaves, para evitar accidentes en la operación de acoplamiento y desacoplamiento de vagones.

3.6 El regreso de la corriente

Todos los polos negativos de todos los equipos, que utilizan la energía eléctrica sobre la locomotora, se conectan a una barra común, que constituye el polo negativo general. De aquí el circuito se debe cerrar la vía, a través de la cual la corriente circula hacia la subestación alimentadora.

En las construcciones más antiguas y en las actuales de baja potencia, (tranvías), esta barra está conectada directamente al chasis y el retorno se efectúa por una vía llamada natural. Esta solución puede provocar problemas en las cajas y chumaceras (calentamientos).

En las locomotoras modernas, la barra está aislada con respecto a los ejes, previendo unas escobillas como se puede apreciar en la figura 3.38.

Como medida de seguridad, se prevee también, el circuito natural, para la eventualidad que las escobillas no están en buen estado, pero este circuito, además de que tiene mayor resistencia, está provisto con un relevador, que manda señales, en caso de que la tensión de la caja, con respecto a la tierra, llegan a valores peligrosos.

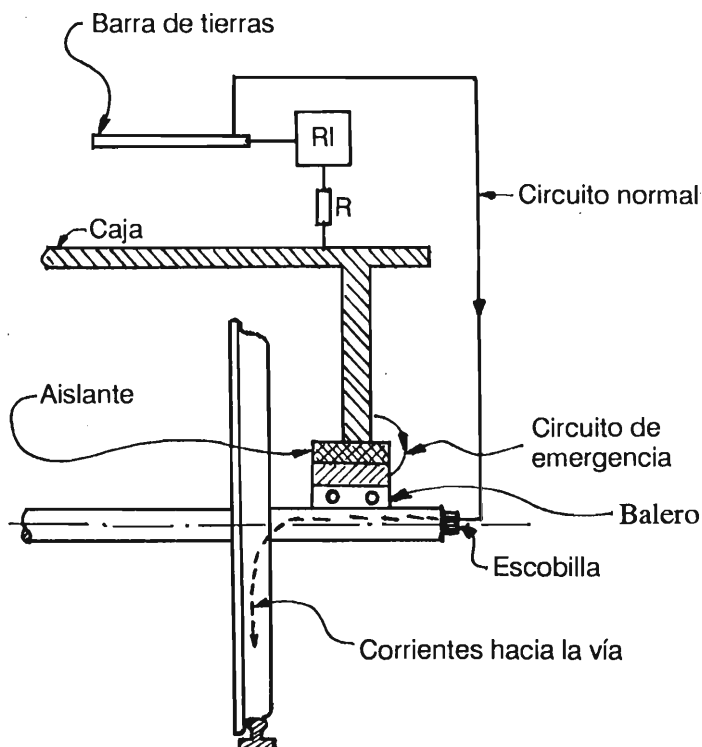


Fig. 3.38 Esquema del retorno de la corriente.

3.7 Aparatos eléctricos principales sobre la locomotora

Una locomotora está equipada con una gran diversidad de aparatos y dispositivos eléctricos.

Estos se agrupan en:

- Aparatos del circuito principal
- Aparatos de mando.
- Aparatos de protección.
- Aparatos de señalización, medición y control.
- Circutería en general.
- Equipos de ejecución.

El presente trabajo, no se propone hacer un estudio completo de los aparatos eléctricos y por lo tanto, a continuación nos limitaremos a nombrar los equipos y aparatos más importantes, deteniéndose solamente sobre los que se utilizan exclusivamente en los sistemas de transporte eléctrico.

Los aparatos más importantes del circuito principal son los siguientes:

- El tomacorriente (pantógrafo).
- El interruptor principal.
- Los contactores.
- Los separadores.

Los aparatos de mando comprenden:

- El regulador de levas (o manipulador de impulsos).
- Botones de pulso.
- Llaves posicionales, etc.

Los aparatos de protección comprenden:

- Descargador autovalvular (apartarrayos).
- Separadores de seguridad.
- Relevadores de protección (maximales, diferenciales, de tensión mínima, etc).
- Fusibles.

Los aparatos de señalización, medición y control comprenden:

- Luces de varias clases.
- Aparato sónico (sirena).
- Aparatos de medición.
- Controladores.

La circutería comprende todo el cableado e interconexiones que se pueden clasificar como:

- Cableado del circuito principal y alta tensión (arriba de 1000 V con respecto a tierra).
- Cableado de circuitos auxiliares, los cuales manejan corrientes de control, medición y protección de baja tensión.

El equipo de ejecución está constituido por servomotores eléctricos o electroneumáticos, electroimanes, etc.

3.7.1 El tomacorriente (pantógrafo)

Todos los vehículos de transporte, que toman la energía eléctrica de una fuente externa, requieren de un dispositivo capaz de tomar la energía de algún hilo o barra, colocado continuamente, paralelo a la vía de circulación.

En el caso de los trenes eléctricos este tomacorriente se coloca sobre el techo del vehículo motriz, para hacer contacto con el hilo continuo, colocado sobre la vía. En el sistema metro, el tomacorriente es lateral.

A continuación nos ocuparemos solamente del tomacorriente de tipo pantógrafo, utilizado para trenes y tranvías.

En el caso de los trenes, todas las unidades locomotrices se proveen con dos pantógrafos utilizando en operación normal solo el colocado atrás, en el sentido del movimiento, por razones de seguridad (un eventual deterioro con el hilo de contacto podría deteriorar otros equipos colocados sobre el techo) y, por la razón de disminuir las resistencia aerodinámicas.

En situaciones especiales, se pueden utilizar los dos (pendientes excesivas, cuando se requieren corrientes muy altas; hielo sobre hilo de contacto, etc).

Un pantógrafo, por su construcción, debe cumplir con las siguientes exigencias:

- La captación de la corriente se debe realizar, al desplazamiento de la locomotora a velocidad nominal, sin interrupciones. Hay que recordar que el hilo de contacto forma una flecha entre dos sustentaciones consecutivas y el pantógrafo debe tener un movimiento sobre la vertical, algunas veces con aceleraciones bastante fuertes.

- El pantógrafo debe ejercitar una presión suficiente y lo más constante posible, para realizar un buen contacto, en las condiciones de velocidad y a la vez bastante ligera, para que el desgaste, tanto del hilo, como de la placa de contacto, sea mínimo.

En la práctica, existen variedades de marcas y tipos constructivos, pero se puede hablar de dos formas constructivas genéricas.

- El pantógrafo simétrico (fig. 3.39).

- El pantógrafo asimétrico (fig. 3.40).

Las partes constructivas principales de un pantógrafo son:

- El chasis (C) sostenido sobre el techo de la locomotora a través de los aisladores (A).

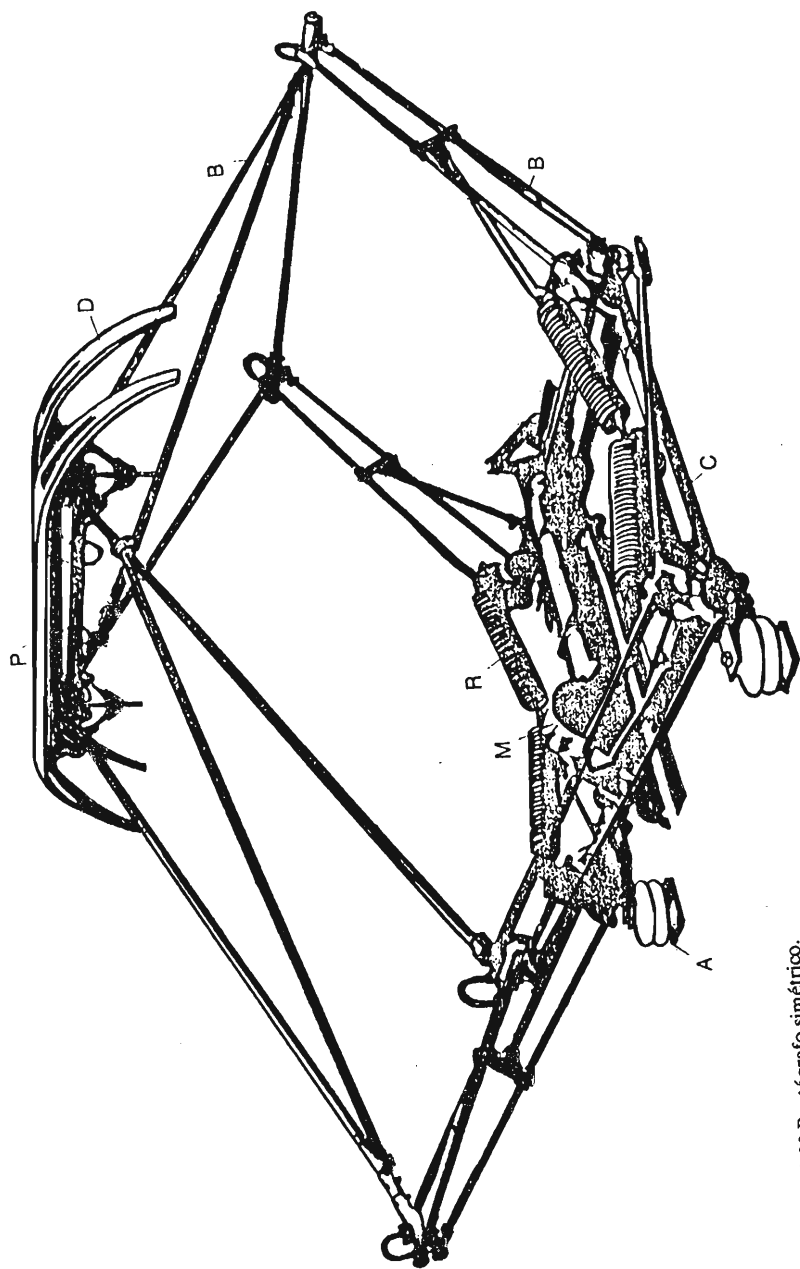


Fig. 3.39 Pantógrafo simétrico.

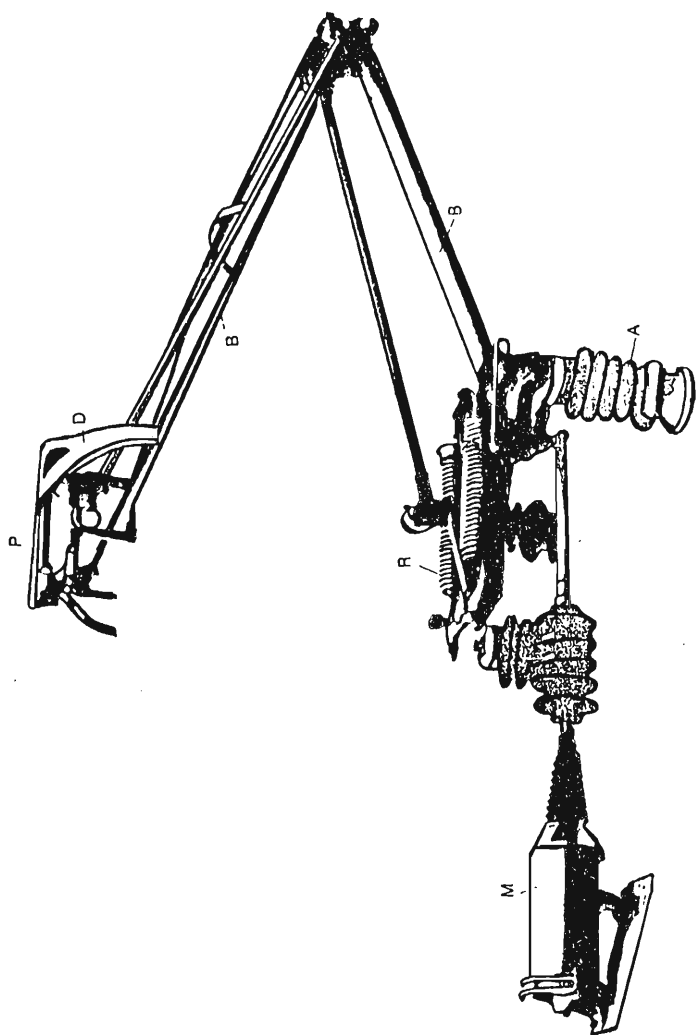


Fig. 3.40 Pantógrafo asimétrico.

- El sistema deformable, constituido por las barras articuladas (B), el cual asegura la aplicación del sistema deslizante (D) sobre el hilo de contacto, en los límites de trabajo del pantógrafo, las cuales, por una reglamentación internacional, se establecieron a una altura mínima de 4.55 m y máxima de 6.5 m.
- El sistema deslizante (D), sobre el cual se fijan las placas de fricción (P).
- Los resortes de trabajo (R), los cuales aseguran el movimiento del sistema articulado y la presión de contacto.
- El mecanismo de mando (M), el cual permite colocar el pantógrafo en la posición de trabajo (elevado), o fuera (posición baja), a voluntad del operador.

El sistema deformable debe asegurar el paralelismo y la estabilidad sobre la lateral del sistema deslizante.

El sistema deslizante está fijado elásticamente en la parte superior del sistema deformable. En las extremidades laterales tiene unas curvaturas, las cuales aseguran el levantamiento del hilo en los cambios de vías.

Este sistema puede ser sencillo o doble y cada parte lleva una o dos placas de contacto, en función de la corriente que tiene que manejar (para 1500 V, C.D., hay corrientes muy fuertes, mientras que para 25 y 50 KV, 50/60 Hz, hay corrientes mucho menores).

El mecanismo de mando trabaja con aire comprimido. La existencia de presión en el cilindro supone la posición de trabajo (elevado) y su falta supone la posición fuera (posición baja).

Todo el pantógrafo, inclusive el cilindro neumático, está bajo la tensión del hilo de contacto, para la cual se necesita un tramo de manguera aislante para la conexión del cilindro, que para tensiones de 15, 25 o 50 KV, implica un cuidado especial.

La placa de contacto colocada sobre el sistema deslizante, se construye de metal (acero, cobre, aluminio etc), o de grafito. En caso de construcción metálica se prevee con una ranura en el centro, en la cual se coloca grasa grafitada, para facilitar el deslizamiento.

En la tabla 3.3, se presentan las corrientes admitidas en función del material utilizado para algunos ejemplos de placas.

La calidad del contacto resulta, tanto de las características constructivas del pantógrafo, como de la suspensión catenaria. Los dos conceptos deben adaptarse y deben tratarse conjuntamente. (Ver cap. 6).

El sistema deslizante, fijado sobre sus suspensiones, debe tener una masa de inercia mínima, para seguir los desniveles del hilo de contacto.

TABLA 3.3
PLACAS PARA PANTOGRAFO

| <i>Placas de grafito</i> | | | | | <i>Placas metálicas</i> | | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| <i>Núm. de placas</i> | <i>Ancho placa (mm)</i> | <i>Corriente (A)</i> | | | <i>Núm. de placas</i> | <i>Ancho placa (mm)</i> | <i>Corriente (A)</i> | | |
| | | <i>Nomi-nal</i> | <i>Uniho-rario</i> | <i>Corta duración</i> | | | <i>Nomi-nal</i> | <i>Uniho-rario</i> | <i>Corta duración</i> |
| 2 | 30 | 250 | 375 | 500 | 2 | 25 | 400 | 600 | 800 |
| 2 | 40 | 335 | 500 | 675 | 4 | 25 | 675 | 1000 | 1350 |

La fuerza que el pantógrafo ejerce sobre el hilo de contacto se puede considerar como compuesta de dos elementos: una estática y la otra dinámica.

De conformidad con las convenciones internacionales, la fuerza estática aplicada del pantógrafo sobre el hilo de contacto, debe estar entre 6 y 8 Kgf (para doble sistema deslizante 10 a 15 Kgf).

Con el desplazamiento del vehículo motriz, por la razón de la elasticidad no uniforme de la catenaria, el hilo de contacto se deforma debido a la fuerza del pantógrafo. Por otro lado, los desniveles del hilo de contacto deberán ser seguidos del pantógrafo, lo cual implica un desplazamiento sobre la vertical de una masa. Esto implica una variación de la fuerza de contacto con la cantidad $m \cdot a$, la cual dependiendo del sentido, se suma o se resta con la fuerza estática.

La fuerza real de contacto será:

$$F_c = F_s \pm m \cdot a \quad (3.97)$$

Donde a es la aceleración con la cual se mueve la masa m sobre la vertical.

Debido a la fuerza dinámica, que en algunos momentos se resta, es necesario aumentar la fuerza de contacto con el cuadrado de la velocidad, es decir introducir una tercera componente en la fuerza de contacto:

$$F_c = F_s + KV^2 \pm m \cdot a \quad (3.98)$$

Esta componente se introduce como una fuerza aerodinámica, dando formas especiales a las componentes constructivas del pantógrafo.

En la figura 3.41 se presenta la variación de la fuerza F_c ejercitada del pantógrafo sobre el hilo de contacto en dos circunstancias distintas. Las líneas pausadas representan las componenets sin considerar la componente de corrección y las líneas llenas las componentes respectivas, con la consideración de la componente correctiva.

Las reglamentaciones internacionales especifican una componente F_a de 12 kgf, para la velocidad de 160 Km/h.

En la tabla 3.4 se presentan las características más importantes de algunos pantógrafos de construcción actual.

3.7.2 Circuitos de mando

Las maniobras de la locomotora están ejecutadas del operador, desde su gabinete de mano, a través de aparatos colocados a su alcance. En las construcciones actuales, todos estos aparatos operan con tensiones bajas y todas las operaciones de mando se transmiten a través de circuitos de control hacia los aparatos de ejecución (contactores, servomotores, etc).

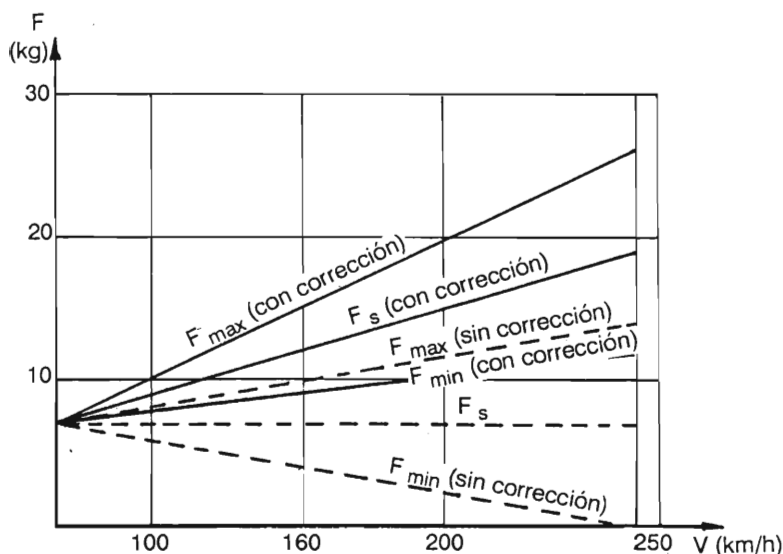


Fig. 3.41 Variación de la fuerza que el pantógrafo ejerce sobre el hilo de contacto, en función de la velocidad.

TABLA 3.4
CARACTERISTICAS TÍPICAS DE LOS PANTOGRAFOS

| <i>TIPO</i> | <i>UTILIZA- CION</i> | <i>SISTEMA DESLI- ZANTE</i> | <i>F_g kgf.</i> | <i>MASA DEL SIS- TEMA MOVIBLE kg.</i> | <i>MASA TOTAL</i> |
|-----------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---|-----------------------|
| Clásico | CD.1.5KV | doble | 9 | 68 | 425 |
| | 25 KV, 60Hz | simple | 7 | 44 | 360 |
| Asimé- trico | 25 KV, 60 Hz | simple | 7 | 32 | 270 |
| | CD.1.5 KV | doble | 9 | 50 | 312 |

En la figura 3.42 se presenta esquemáticamente, en principio, el circuito de mando colocado sobre una locomotora.

Como aparato de mando centralizado se utiliza, sea un regulador de levas (que maneja corriente de mando, a baja tensión), sea un manipulador de impulsos (que consta de un volante, el cual, en función de su oposición manda impulsos hacia los aparatos de ejecución).

3.8 El freno eléctrico

Los vehículos que utilizan la energía eléctrica, como fuerza motriz, se pueden equipar con freno eléctrico, cuya realización es posible debido a la reversibilidad del motor eléctrico, el cual pasa a trabajar en régimen generador eléctrico.

En régimen de motor, la energía eléctrica de la catenaria se transforma en energía mecánica, empleada como energía motriz.

En régimen de freno, la energía cinética ($1/2 mV^2$) o la energía potencial (Qh) acumulada por el vehículo en marcha, respectivamente en las pendientes cuesta abajo, la máquina eléctrica (el motor) trabaja como generador, transformando la energía mecánica en energía eléctrica, la cual es transformada en calor sobre unas resistencias y disipada en la atmósfera (freno eléctrico dinámico), o es inyectada a la catenaria (freno eléctrico recuperativo).

Recordamos la relación de la potencia para el régimen motor:

$$KUI\eta = FV \quad (3.99)$$

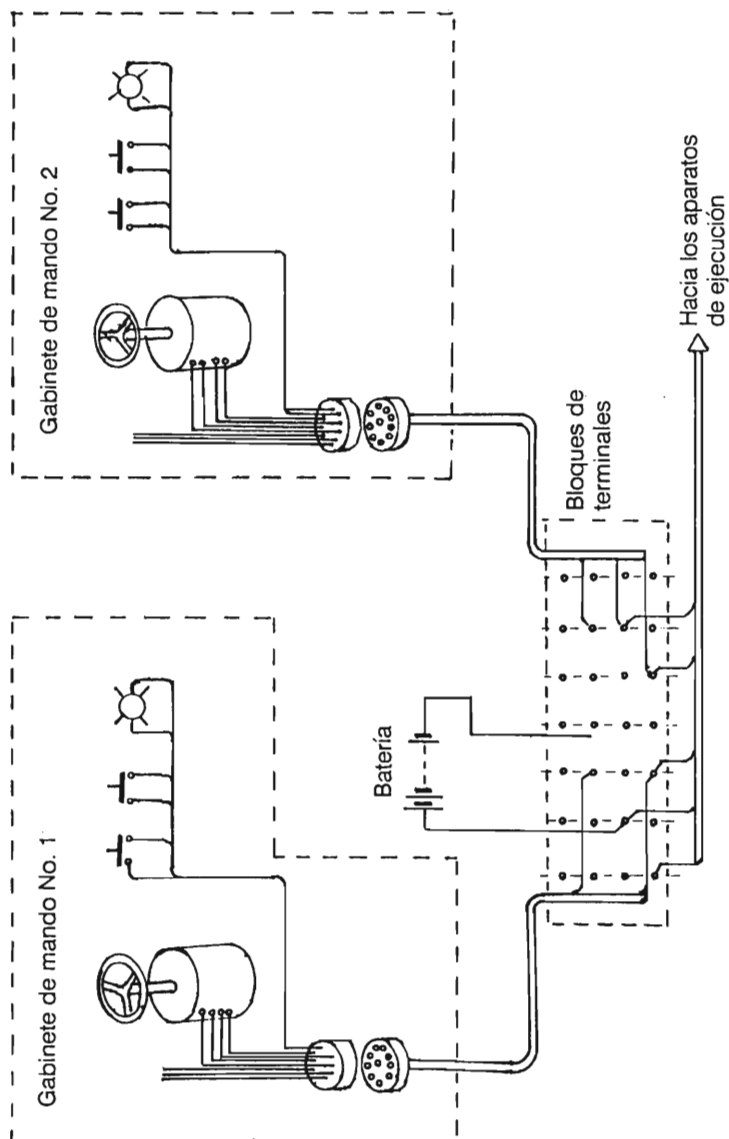


Fig. 3.42 Ejemplo de disposición para los circuitos de mando sobre una locomotora eléctrica.

Donde:

U= tensión de la catenaria.

I= corriente absorbida por la locomotora.

η = eficiencia global.

F= fuerza desarrollada al gancho.

V= velocidad de marcha.

K= constante de proporcionalidad.

En régimen de freno, la relación general se transforma en:

$$FV = KUI \frac{1}{\eta_f} \quad (3.100)$$

Donde η_f es la eficiencia en régimen de freno y se emplea en otro sentido, debido a la inversión del sentido del flujo de energía.

La ecuación de la fuerza (2.22) se transforma en:

$$-F_f = R_v - F_i - (1 + \gamma) m a \quad (3.101)$$

o sea:

$$F_f = F_i + (1 + \gamma) m a - R_v \quad (3.102)$$

La única fuerza que siempre actúa como freno es R_v (fricciones) mientras que las otras pueden cambiar de sentido: F_f = es fuerza de freno esta vez: F_i = es fuerza de impulso debido a la pendiente (cuesta abajo, cuando se necesita el freno); $(1 + \gamma) m a$ = es la fuerza de deceleración, cuando se trata de disminuir la velocidad, (mejor dicho la aceleración cambia de sentido).

Las principales ventajas del freno eléctrico son:

- Aumenta la seguridad de la circulación, disponiendo de un freno suplementario (de motor) además de los frenos mecánicos (de zapatas).
- Utilizando el freno eléctrico se evita el desgaste de las zapatas y el revestimiento de las ruedas, el cual representa un serio problema en operación.
- Evita la producción de polvos metálicos, despedidos por la fricción de las zapatas, polvos que deterioran los equipos eléctricos.
- El freno eléctrico no depende de las condiciones atmosféricas.
- En el caso del freno recuperativo, por la economización de energía se llegan a disminuir los gastos de operación.

El freno eléctrico presenta, también algunas desventajas como son:

- Es difícil aplicarlo a bajas velocidades. Por ésta razón se utiliza como freno para mantener y regular la velocidad sobre pendientes y no como freno de paro.

- Necesita más equipos eléctricos, lo cual encarece y complica la unidad locomotora.

- El motor eléctrico sigue calentándose, también en régimen de freno, debido a su trabajo como generador.

Con respecto a la carga detenida por una locomotora sobre una pendiente, se demuestra que ésta es mayor que la carga que tendría que subir sobre la misma pendiente y en las mismas condiciones de velocidad. Esto se debe por un lado, a la inversión del flujo de energía, lo cual hace que la eficiencia se aplique en el sentido contrario (en vez de multiplicar, divide la potencia $U \cdot I$) y por otro lado, a la inversión de la tensión (la tensión como generador es aproximadamente 1.2 de la tensión como motor, para que la energía fluya hacia la catenaria).

3.8.1 El freno eléctrico reostático, con generador tipo serie

Para que un motor serie, funcionando en éste régimen, pueda pasar a funcionar en régimen generador, deben cumplirse las siguientes condiciones:

- Desconectar la fuente de alimentación.

- Guardar el sentido de la corriente en el devanado de excitación, para no desaparecer el magnetismo remanente, indispensable para arrancar la operación en régimen generador.

Como consecuencia de que:

- El sentido de giro es el mismo y para obtener:

- El cambio del sentido del par $M_{\text{motor}} = - M_{\text{generador}}$.

Resulta obligatorio:

- Cambiar el sentido en el devanado de armadura.

- El generador deberá disipar su energía sobre una resistencia de freno.

La última condición se debe a la inestabilidad del generador serie, funcionando en paralelo con otra fuente.

El generador serie, en las condiciones arriba descritas, si tiene una operación estable. Para mostrar esto, hacemos uso de la figura 3.43c y la expresión que representa la tensión de la máquina en régimen transitorio

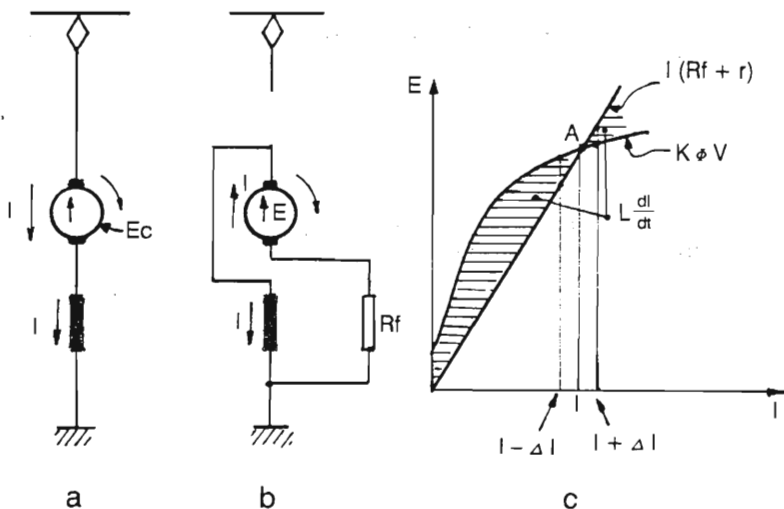


Fig. 3.43 Freno reostático con motor serie: a - Régimen de motor; b - régimen de freno reostático; c - Estabilidad en régimen de freno reostático.

$$E = K\phi V = (R_f + r)I + L \frac{dI}{dt} \quad (3.103)$$

donde aparece el término

$L \frac{dI}{dt}$ = caída de voltaje debido a la autoinductancia L en el proceso transitorio.

Para analizar esta expresión, la escribiremos en otra forma:

$$L \frac{dI}{dt} = K\phi V - (R_f + r)I \quad (3.104)$$

Los términos de esta expresión están presentados en la figura 3.43c. Las variables son el voltaje y la corriente.

El último término representa una línea recta.

El término $K\phi V$ es la curva de magnetización, para una determinada velocidad $V = \text{constante}$.

Resulta que el primer término es la diferencia entre los dos mencionados anteriormente.

El punto A representa el régimen de operación estable para $I =$ constante;

$$\frac{dI}{dt} = O y K \phi V = (R_f + r)I$$

Si por alguna razón aparece una $I + \Delta I$, entonces aparece en el circuito una reacción negativa.

$$L \frac{dI}{dt} < 0$$

Al contrario, si aparece una $I - \Delta I$, el proceso se produce al revés, o sea $L \frac{dI}{dt} > 0$, lo que hace que aparezca un aumento en la corriente I .

De lo dicho hasta aquí, resulta que la estabilidad eléctrica del generador serie, operando como freno reostático, esta asegurada.

Si nos referimos a la estabilidad dinámica del generador serie en régimen de freno reostático, tenemos que aclarar primero este concepto.

Un freno para un vehículo se dice que presenta estabilidad mecánica si al aumentar la velocidad, aumenta la fuerza de freno y viceversa.

En el caso del generador serie, al aumentar la velocidad, aumenta la fuerza electromotriz inducida ($K \phi V$), lo cual produce un aumento en la corriente (I) e implícitamente el par de freno ($M = K \phi I$), quedando aclarada la estabilidad mecánica del generador serie en régimen de freno reostático.

La conexión de las máquinas en éste tipo de freno puede ser:

- cada una individual.
- varias en serie.
- varias en paralelo.

La conexión individual no se practica, porque requieren de muchas unidades de resistencia.

La conexión en serie requiere de valores muy altos para las resistencias, lo que resulta, también impráctico debido a que:

$$P_f = R_{fs} I^2 \text{ (conexión serie)} \quad (3.105)$$

$$P_f = R_{fp} (2 I)^2 \text{ (conexión paralelo)} \quad (3.106)$$

Como P freno e I son las mismas, resulta que:

$$R_{fs} = 4R_{fp} \quad (3.107)$$

Resulta que la conexión en paralelo es la más aceptable, cuidando que el valor de la corriente en las resistencias no rebase los límites térmicos.

En este tipo de conexión hay que cuidar otro aspecto muy importante: puede aparecer la inestabilidad eléctrica en la operación de las máquinas.

En la figura 3.44 se presentan dos máquinas trabajando en paralelo. Si por una razón las características de las dos máquinas difieren (diferencias en las resistencias internas o entre los diámetros de las ruedas motrices, por el desgaste diferido, cosa práctica frecuente), resultan diferencias entre las fuerzas electromotrices. Viendo la figura 3.44a se puede escribir:

$$E_1 - E_2 = 2r \cdot I_3 \quad (3.108)$$

y después:

$$I_1 = \frac{I}{2} + I_3; I_2 = \frac{I}{2} - I_3 \quad (3.109)$$

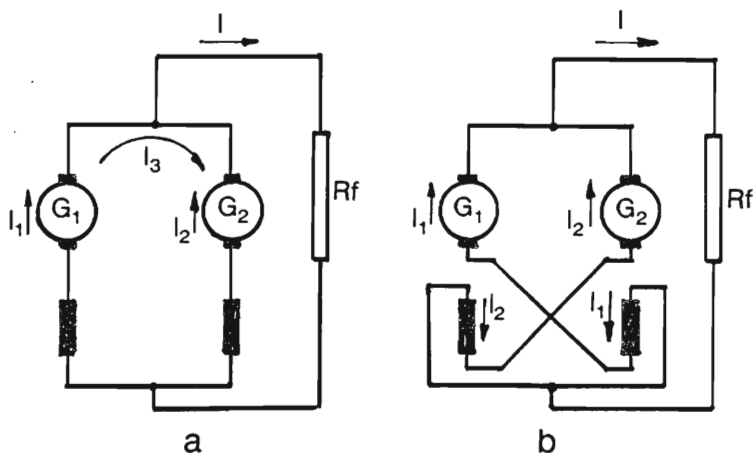


Fig. 3.44 Conexión de dos máquinas tipo serie, en paralelo, para freno reostático: a - Conexión paralelo normal; b - Conexión paralelo con excitaciones cruzadas.

La corriente I_3 , amplifica rápidamente el valor de E_1 disminuyendo el valor de E_2 , hasta que $I_3 = 1/2$, situación en la cual G_2 cambia de polaridad, las máquinas funcionando en corto circuito, dejando de pasar corriente en la resistencia de freno, o sea, el diagrama no funciona (no hay estabilidad).

Para resolver este problema, se cruzan las excitaciones entre las dos máquinas, como se ve en la figura 3.44b. Cualquier aumento de la corriente I_1 provoca un aumento de la tensión en las terminales de la máquina G_2 , teniendo como efecto el aumento de la corriente I_2 , situación que conduce a una regulación automática e implícitamente a una operación estable.

Sobre una locomotora real hay varias máquinas, las cuales se agrupan en diversas conexiones prácticas, teniendo en consideración lo que se comentó anteriormente.

En la figura 3.45a se presenta esquemáticamente el diagrama del freno reostático de una locomotora B-B y en la figura 3.45b el diagrama correspondiente a una locomotora C-C. La solución de la figura 3.45b, nombrada "ciclico-doble", es aplicada sobre las locomotoras soviéticas VL-19.

La característica del freno, o sea la fuerza del freno (F_f) en función de velocidad (V), para la máquina serie geneando sobre una resistencia, se traza partiendo de los parámetros del motor, los cuales se suponen conocidos.

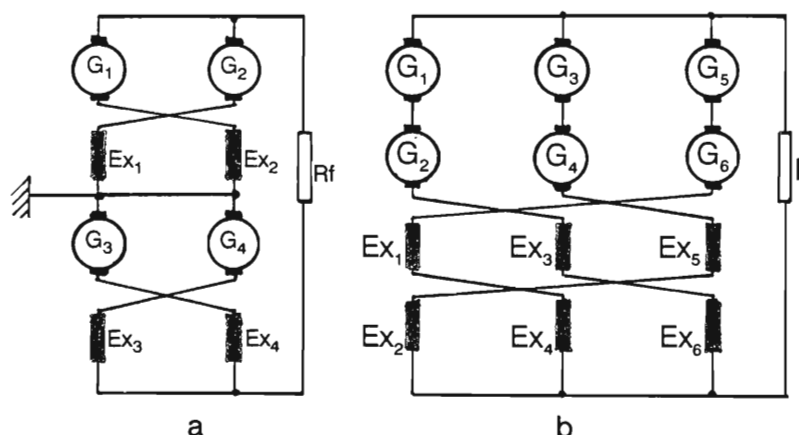


Fig. 3.45 Diagramas de conexión para freno reostático: a - una locomotora B - B; b - una locomotora C-C.

La característica en vacío $E(I)$, para una velocidad determinada, para la máquina utilizada se conoce, (similar a la figura 3.6).

En el caso que se quiera determinar esta característica experimentalmente, se tiene que conectar la máquina con excitación separada.

De la característica $E(I)$ para una velocidad V_n se calculan varias características $E(I)$, para V_1, V_2, \dots multiplicando las ordenadas para la misma corriente con los valores $V_1/V_n, V_2/V_n$ etc., debido a que $E = K\phi V$.

Estas curvas se ven en la figura 3.46.

En el párrafo 3.2.5.7, se vio la característica $F(V)$ para la operación de la máquina como motor.

Partiendo de la misma característica, se puede deducir la característica del freno con la expresión:

$$F_f(I) = \frac{F_m(I)}{\eta_t \eta_m^2} \quad (3.110)$$

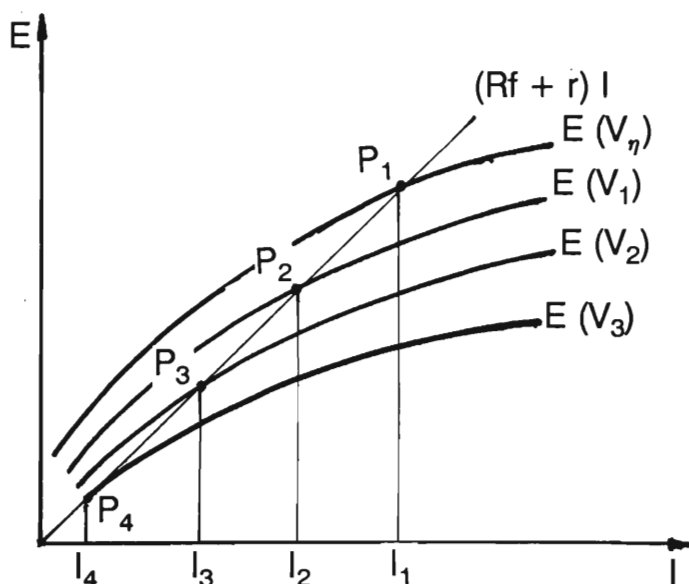


Fig. 3.46 La característica $E(I)$ para una máquina tipo serie a distintas velocidades.

Donde:

$F_m(I)$ = fuerza tractiva de la máquina como motor:

$F_f(I)$ = fuerza de freno

η_t = eficiencia de la transmisión ($\cong 0.98$)

η_m = eficiencia de la máquina ($\cong 0.94$)

La construcción gráfica de la característica de la fuerza tractiva de freno, en función de la corriente, está presentada en la figura 3.47.

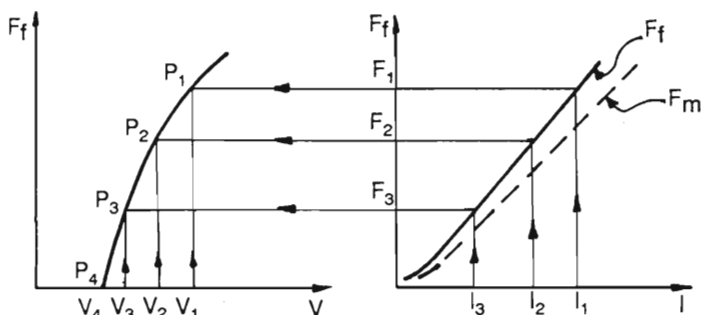


Fig. 3.47 La construcción gráfica de la curva $F_f(V)$ para un valor de resistencia R_f dado.

Para un valor determinado de R_f , la variación del voltaje, con respecto a la corriente, será:

$$E = (R_f + r) I \quad (3.111)$$

La cual representa una recta (ver sobre la figura 3.46), determinando los puntos P_1, P_2, P_3 , de operación, correspondientes a cada velocidad y a estos puntos les corresponden las corrientes I_1, I_2, I_3 ... a estas corrientes les corresponden las fuerzas F_1, F_2, F_3 ... las cuales combinadas con las velocidades V_1, V_2, V_3 ... dan como resultado los puntos P_1, P_2, P_3 ... sobre el plano $F(V)$, teniendo al fin, la característica del freno, para el valor de la resistencia considerada. (Ver la combinación entre las figuras 3.46 y 3.47).

Se aprecia que el punto P_4 corresponde a una fuerza de freno igual a cero. Hay que recordar que la característica $E(I)$, era en vacío.

Considerando las deformaciones del campo, debido a la carga (la reacción de armadura), la característica real $E(I)$ tiene la forma presentada en la figura 3.48.

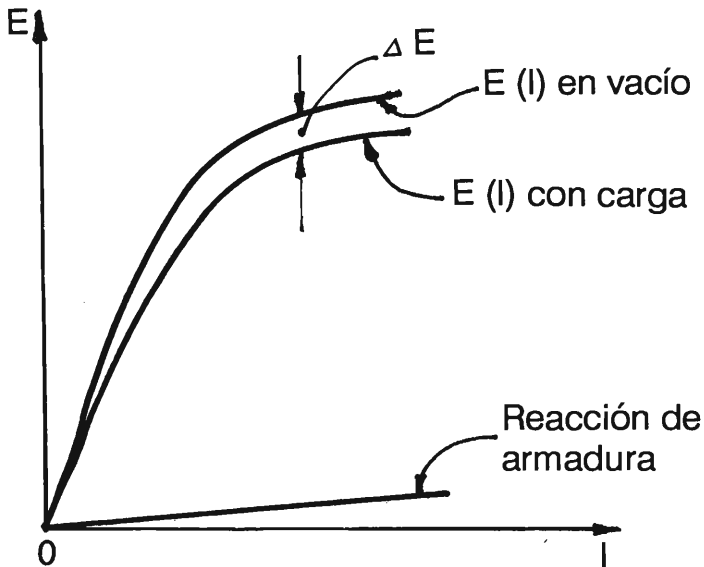


Fig. 3.48 Característica $E(I)$ con carga, considerando la reacción de armadura.

Por otro lado, la eficiencia de la máquina es más pobre para cargas pequeñas, deformando la característica $F_f(V)$, en su parte inferior.

La regulación de la fuerza del freno, se logra variando el valor de la resistencia R_f .

Esta variación no se puede realizar continuamente, lo cual implica hacerla por pasos.

Así, resulta una curva característica $F(V)$ para cada valor de la resistencia del freno. (ver fig. 3.49).

Cuando la locomotora circula a su velocidad máxima (con reducción de campo) primeramente hay que aumentar el campo a su valor nominal y después entrar en régimen de freno reostático. Con un número mayor de características $F_f(V)$, lo cual implica un mayor número de pasos de resistencia, se logra una mayor flexibilidad operativa. Los factores limitantes del freno son los siguientes:

- Los parámetros de la máquina (V, I), cuales a su turno implican limitaciones a la característica $F(V)$.
- La velocidad máxima de la locomotora.
- La fuerza de adherencia de la locomotora. Estos tres factores limitantes están representados sobre la figura 3.49.

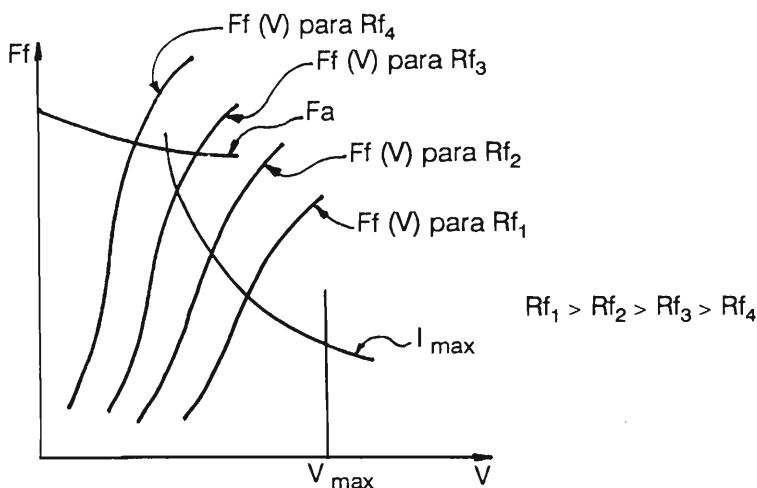


Fig. 3.49 Características de freno reostático para varios valores de la resistencia eléctrica R_f .

El cálculo del reóstato para freno, se realiza por algún método, por ejemplo grafo-analítico, semejante al descrito en el párrafo 3.4.1, para satisfacer los requerimientos de un proyecto en particular.

3.8.2 El freno eléctrico, reostático con generador de excitación separada

El freno eléctrico, reostático se puede aplicar a una locomotora con máquinas conectadas en serie, desconectando este tipo de conexión (serie) y volviendo a conectar las máquinas (en el momento de aplicar el freno) en conexión separada, para el régimen generador.

Como fuente de excitación se puede utilizar, sea un grupo motor generador, como se muestra en la figura 3.50, sea un equipo con elementos a base de semiconductores, con la posibilidad de mantener constante, o controlar debidamente, la tensión de salida.

Estudiaremos más detenidamente el primer método, con la ayuda de la figura 3.50, para el generador provisto con una tensión de excitación constante y conectando como se muestra.

Se puede escribir:

$$E = K\phi V = (r + R_f) I \quad (3.112)$$

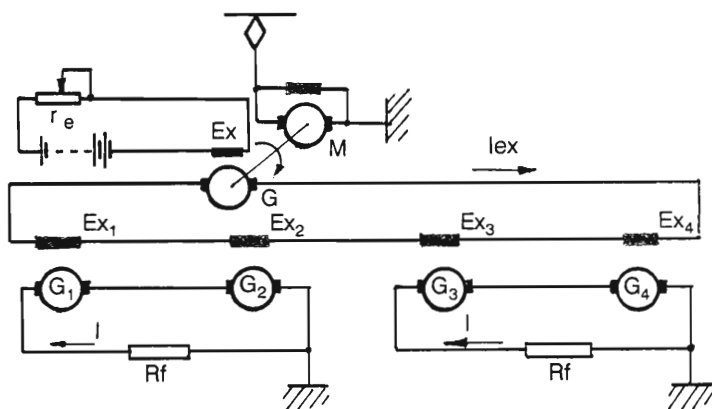


Fig. 3.50 Diagrama de principio para freno reostático, con excitación independiente, correspondiente a una locomotora B-B.

Como $\phi = \text{constante}$, resulta que:

$$I = KV \quad (3.113)$$

o sea, la característica F_f (V) está representada por una recta (ver fig. 3.51) para un determinado valor de la corriente de excitación.

Si controlamos la corriente de excitación, con la ayuda del reóstato r_e , en el circuito de la excitatriz se obtienen las características de freno, como rectas de pendientes variable, como se puede ver en la figura 3.51.

Si se desea mantener la fuerza de freno dentro de los límites controlados, se debe aumentar la corriente de excitación, a medida que la velocidad está bajando. Por otro lado a medida que la corriente de excitación aumenta, entramos en el dominio de saturación de la máquina, además de que esta corriente no puede rebasar ciertos límites por razones de calentamiento. ($I_e \text{ max}$).

El dominio de estas características está limitado por:

- La corriente de excitación máxima
- La velocidad máxima
- La fuerza de adherencia máxima
- Una curva hipérbolica, correspondiente a la corriente de armadura máxima.

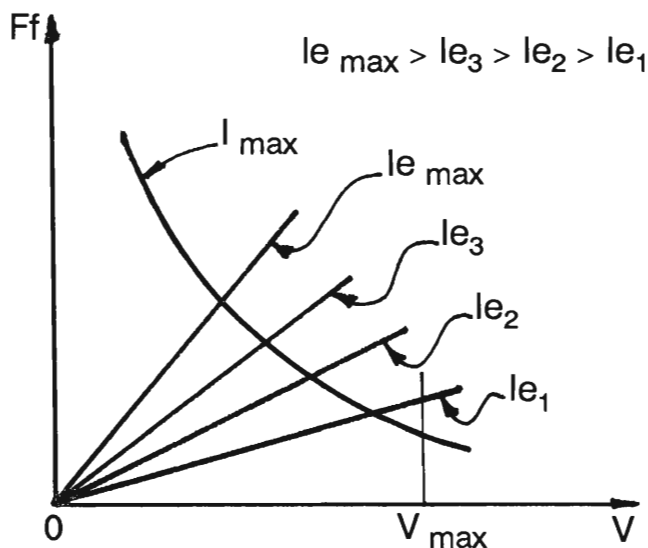


Fig. 3.51 Características de freno reostático para excitación independiente.

3.8.3 El freno recuperativo

Nombramos freno recuperativo al proceso por el cual, la energía cinética adquirida por el vehículo en movimiento es transformada en energía eléctrica e inyectada en la catenaria, teniendo como finalidad, el control de la velocidad, con recuperación de energía.

Esto supone que la máquina eléctrica pasa a funcionar en régimen generador, trabajando a una tensión mayor que la existente en la catenaria, debido a que la ecuación de la máquina se aplica en la forma:

$$E = U + rI \quad (3.114)$$

La máquina serie no se puede utilizar como generador en el freno recuperativo, debido a su falta de estabilidad en este régimen.

Para demostrar esto, escribimos la relación de la máquina en la siguiente forma:

$$E = K\phi V = U + rI + L \frac{dI}{dt} \quad (3.115)$$

que corresponde al proceso transitorio, (recordando que el valor de la corriente varía desde un valor cero, hasta un valor $I = \text{constante}$).

Escrita de otra forma:

$$L \frac{dI}{dt} = K\phi V - (U + rI) \quad (3.116)$$

Representamos sus términos sobre una gráfica de coordenadas corriente y voltaje (ver fig. 3.52), y observamos que resultan dos puntos de operación, A_1 y A_2 , cuales satisfacen la relación anterior.

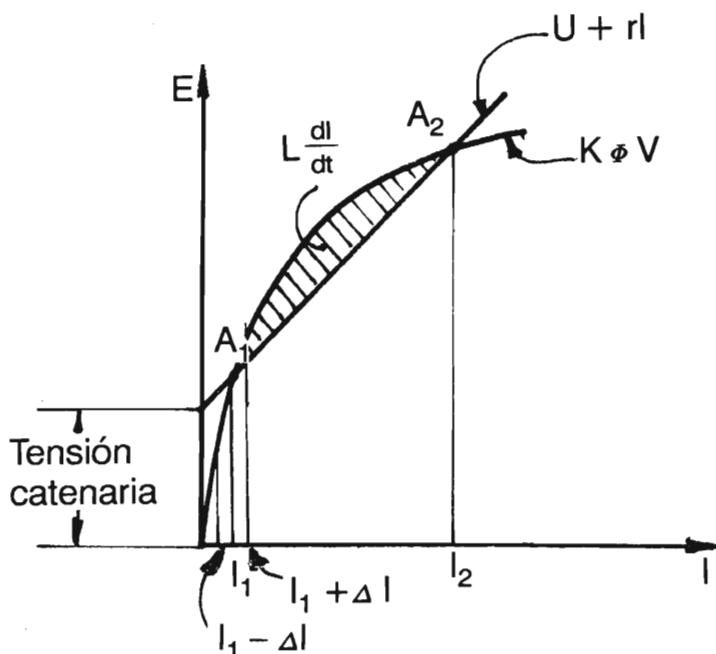


Fig. 3.52 La inestabilidad eléctrica de la máquina serie, operando en régimen de freno recuperativo.

Las superficies con hachura representan el término $L \frac{dI}{dt}$, cambiando de signo cada vez que pasa de un lado al otro, a través de los puntos A_1 y A_2 .

El punto A_1 es un punto inestable de operación, aunque se sitúa en rangos normales de la corriente de la máquina.

Suponiendo un incremento de la corriente, o sea $I_1 + \Delta I$, la reacción que aparece en el circuito $L \frac{dI}{dt} > 0$, significa un incremento mayor de la corriente, llegando al punto de operación A_2 . Este punto, si es estable pero la corriente es demasiado alta para la operación de la máquina.

Si al contrario, consideraríamos un decremento de la corriente, o sea $I_1 - \Delta I$, la reacción será negativa, $L \frac{dI}{dt} < 0$, lo cual crea una menor corriente, decreciendo rápidamente hasta cero y después cambiando de signo, o sea, pasa en régimen de motor, con lo cual damos por concluida esta demostración.

Para el freno recuperativo, las máquinas de corriente directa se utilizarán conectadas con excitación separada o con excitación diferencial.

Recordamos que en la excitación separada las ampervueltas que crean el campo de la máquina no dependen de la carga y que la excitación diferencial consiste de dos excitaciones distintas, una primera excitación tipo shunt, que crea el campo de la máquina, la cual podemos decir que es independiente de la carga y una segunda excitación de tipo serie, la cual implica que es proporcional con la carga y orientada en oposición con respecto a la primera.

El cálculo de las ampervueltas totales resultan como:

$$AV \text{ totales} = AV \text{ shunt} - AV \text{ serie.}$$

En las anteriores no se consideraron los fenómenos de reacción de armadura y saturación.

La figura 3.53b presenta la característica interna para un generador de excitación separada y la figura 3.53a la característica interna para un generador con excitación diferencial.

Para juzgar la estabilidad de la máquina operando en este régimen, aplicamos el mismo criterio que vimos para el caso de la máquina serie. Se demuestra fácilmente que estos dos tipos de conexiones presentan estabilidad, operando en régimen de freno recuperativo.

Existe un sólo punto de operación A. Considerando una desviación $I \pm \Delta I$, la reacción que aparece es de tal signo, que se regresa al punto A, de operación estable. (Ver fig. 3.53a y b).

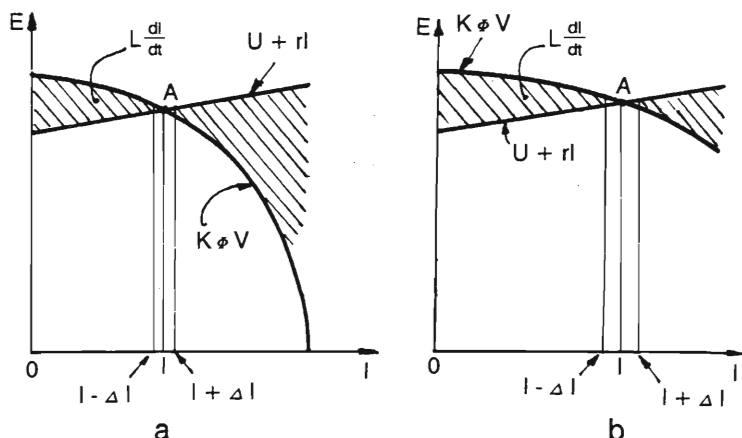


Fig. 3.53 La estabilidad eléctrica, en régimen de freno recuperativo de: a - máquina con excitación diferencial; b - máquina con excitación separada.

A continuación compararemos entre sí estos dos tipos de excitación y sus implicaciones sobre la estabilidad en la operación.

En la figura 3.54 se presenta la característica $E = K\phi \cdot V$ en función de la carga (la corriente I); la curva S corresponde a la máquina con excitación separada y la curva D corresponde a la máquina con excitación diferencial.

Se supone la operación en paralelo de la respectiva máquina, en régimen generador, con la línea de contacto, de tensión U .

Si esta tensión (la cual en realidad tiene variaciones apreciables), baja a un valor U_B , la corriente en la máquina conectada con excitación diferencial sube al valor I_{BD} , mientras que la corriente en la máquina con excitación separada sube al valor I_{BS} .

Si al contrario, consideramos que la tensión de la línea sube al valor U_A , el valor de la corriente para la conexión diferencial baja al valor I_{AD} , mientras que el valor de la corriente, para la conexión separada alcanza a cambiar de signo (I_{AS}), lo que implica su paso en régimen de motor.

De esto se desprende la neta superioridad del comportamiento, en condiciones reales de operación de la máquina conectada con excitación diferencial, en el empleo como freno recuperativo.

Hay que reconocer que en la práctica actual, el uso de la máquina con excitación separada es más generalizada, debido a la complicación constructiva de la máquina con excitación diferencial.

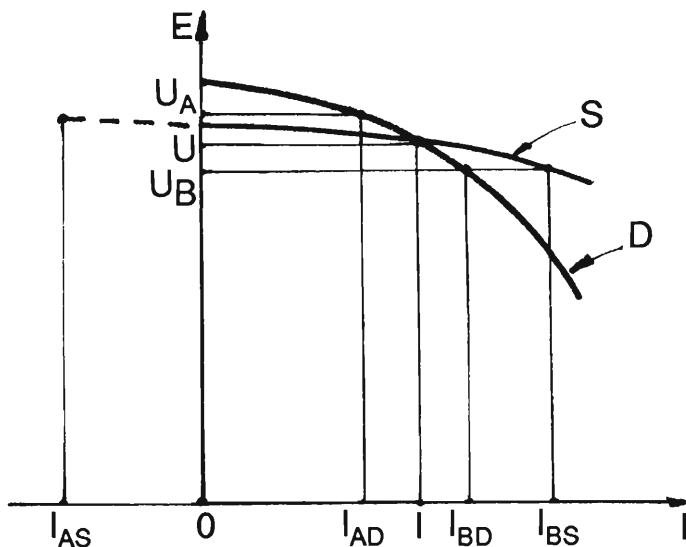


Fig. 3.54 El comportamiento en régimen de freno recuperativo de: S- máquina con excitación separada. D- máquina con excitación diferencial.

Esto implica un cuidado especial sobre la corriente recuperada, lo que significa una complicación en el diagrama. Se juzga, pues la complicación, o el encarecimiento de la máquina, contra el encarecimiento del diagrama (o sea los aparatos provistos en el diagrama).

Continuando con la comparación entre los dos tipos de excitación, trataremos la elasticidad del freno recuperativo. Para un generador de excitación separada tenemos:

$$E = K\phi V = U + rI \quad (3.117)$$

de donde:

$$V = \frac{U + rI}{K\phi} \quad (3.118)$$

Si consideramos la velocidad y la excitación constantes, suponiendo una variación de la tensión desde U_1 hasta U_2 ($U_1 > U_2$),

las respectivas curvas $V(I)$ tendrán la forma como se indica en la figura 3.55a; P_1 y P_2 representando los puntos de operación correspondientes a las tensiones U_1 , respectivamente U_2 , con sus consiguientes corrientes I_1 e I_2 .

La fuerza de freno es proporcional a la corriente. En el supuesto caso que ocurre una variación repentina de la tensión U implica una variación amplia en la fuerza de frenado.

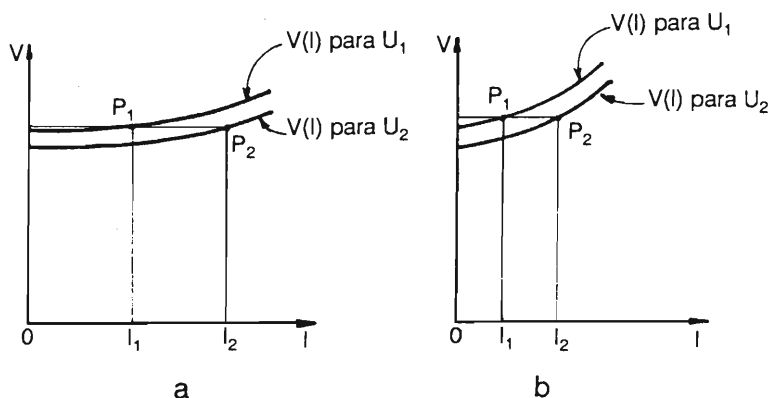


Fig. 3.55 Características $V(I)$ en régimen de freno regenerativo: a- máquina con excitación separada. b- máquina con excitación diferencial.

Esto implica la previsión de algún sistema de estabilización para la corriente recuperada, para independizar, hasta donde sea posible, la fuerza de frenado con respecto a las variaciones de tensión en la catenaria.

Las variaciones de la corriente se pueden atenuar, introduciendo en el circuito una resistencia R . Se puede demostrar que:

$$\Delta I = \frac{\Delta U}{r + R} \quad (3.119)$$

Esto significa un consumo de energía sobre una resistencia, e implícitamente una disminución en la energía recuperada.

Una disminución de las variaciones de la corriente se produce cuando las curvas $V(I)$, tienen un aspecto, como se indican en la figura 3.55b. Estas curvas son propias de la máquina conectada con excitación diferencial.

Una manera de hacer que la máquina de excitación separada se comporte como una máquina de excitación diferencial, es utilizando una excitatriz diferencial.

En la figura 3.56 se presenta el diagrama de un tal arreglo. Por un lado tenemos una máquina grande G (la propia máquina de tracción) de excitación separada y por otro lado, un grupo motor-generator g - m para suministrar la excitación a la primera.

La excitación de la excitatriz g , es de tipo diferencial, o sea, I_{ext} es independiente y constante, mientras que $\%I$ crea el flujo diferencial, proporcional a la corriente I , generada por G . El flujo resultante en la excitatriz g y con esto la corriente de excitación I_{ex} varía de manera diferencial, resultando curvas de operación como se muestran en la figura 3.55b.

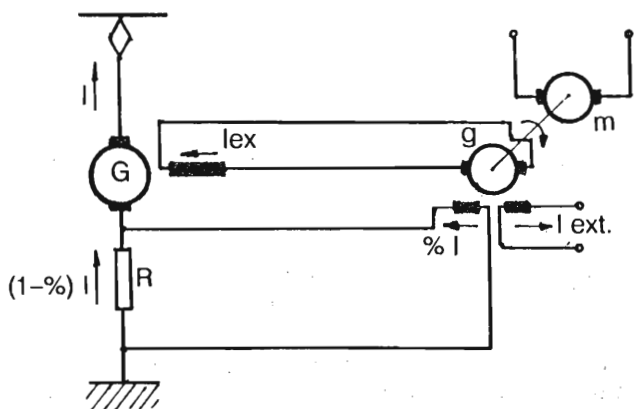


Fig. 3.56 Freno recuperativo con excitación separada y grupo excitatriz diferencial.

En la figura 3.57 se presenta un diagrama, definido como “freno recuperativo con generador de excitación separada y resistencia para estabilización”.

Para el circuito cerrado de este diagrama se puede escribir:

$$e_g = R(I + i) + r i \quad (3.120)$$

De donde:

$$i = \frac{e_g - RI}{R + r} \quad (3.121)$$

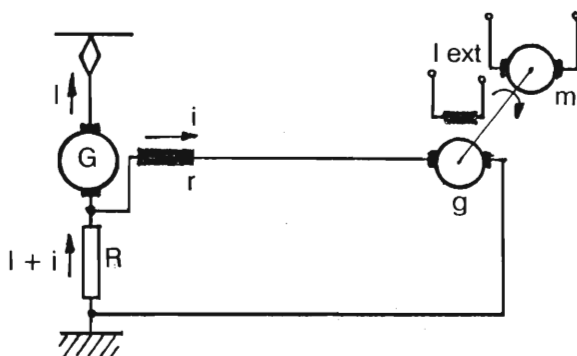


Fig. 3.57 Freno recuperativo con excitación separada, grupo excitatriz y resistencia para estabilización.

Se aprecia que un incremento de I conduce a un decremento de i , para una excitación constante de g .

El diagrama presenta la desventaja ya señalada, del consumo de energía sobre la resistencia R .

Por último, en este capítulo, estudiaremos la característica de freno recuperativo, así como el dominio de su aplicabilidad. Utilizando la misma simbología, la fuerza de freno se puede expresar como:

$$F_f = K_1 V - K_2 U \quad (3.122)$$

La representación gráfica, sobre un plano $F(V)$, es una recta, para $i = \text{constante}$.

Debido a la reacción de armadura, la característica real es de la forma dibujada en la figura 3.58.

En la misma figura se muestran varias curvas, para varios valores de la corriente de excitación i_1, i_2, i_3 . De aquí resulta la manera de controlar la fuerza del freno, o sea, para desplazarnos de una característica a otra, se actúa sobre la corriente de excitación, que es una operación que se realiza con facilidad.

Para construir la característica de freno recuperativo, se parte de una aproximación; se desprecia la reacción de armadura.

Para flujo constante tenemos:

$$E = E_1 \frac{V}{V_1} \quad (3.123)$$

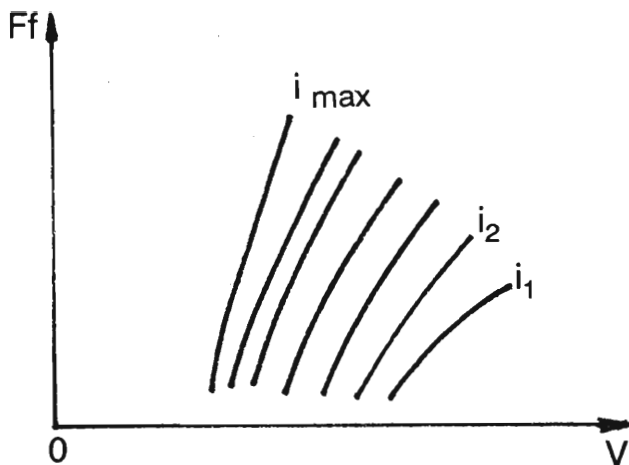


Fig. 3.58 Características $F_f(V)$ para varios valores de corriente de excitación.

o sea;

$$U + rI = E_1 \frac{V}{V_1} \quad (3.124)$$

de donde:

$$I = \frac{E_1}{r} \frac{V}{V_1} - \frac{U}{r} = \frac{1}{V_1} \frac{E_1}{r} \left(V - \frac{U}{E_1} V_1 \right) \quad (3.125)$$

considerando:

$$V_o = \frac{U}{E} V_1 \quad (3.126)$$

resulta:

$$I = \frac{1}{V_1} \frac{E_1}{r} (V - V_o) \quad (3.127)$$

Considerando la relación de la fuerza (3.36), así como las eficiencias que intervengan, las características de freno tendrán el aspecto mostrado en la figura 3.58.

Para la estabilización de la corriente recuperada I , debe existir una ley de variación inversa con la corriente de excitación.

Los valores prácticos de la relación I/i son entre 2 y 3 por razones de conmutación.

La característica $F(V)$, para $I_{\max} = \text{constante}$, tiene una forma hiperbólica.

El dominio de utilización del freno recuperativo será limitado por:

- La corriente máxima de excitación i_{\max} .
- La corriente recuperada máxima I_{\max} , admitido por la máquina
- El valor máximo admitido para la relación I/i . (Flujo debilitado a un mínimo).

- La velocidad máxima admitida por el vehículo.

Este dominio de utilización está presentado en la figura 3.59.

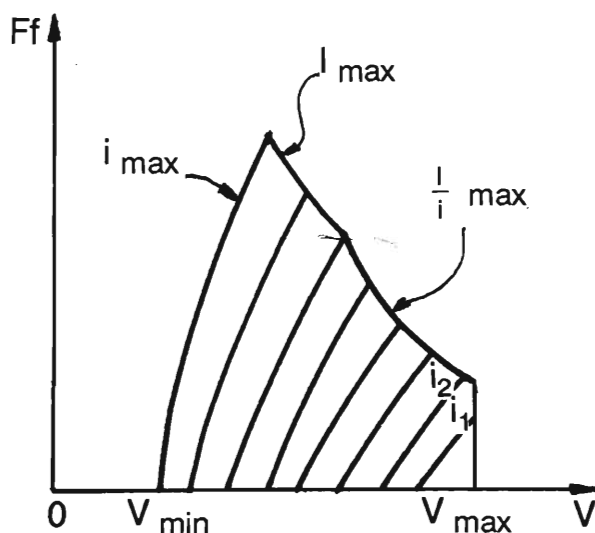


Fig. 3.59 El dominio de utilización del freno recuperativo.

4. Locomotora monocontinua con rectificadores estáticos

En el capítulo introductorio se definió el sistema monocontinuo como el sistema monofásico, a la frecuencia industrial (50/60 Hz) y tensión de 25 KV.

Este sistema incluye también las locomotoras con rectificación a base de vapores de mercurio, pero en el presente capítulo consideraremos solamente la rectificación estática, (a base de diodos semiconductores).

Este tipo de locomotora es el de mayor interés en los transportes férreos interurbanos. (Ver cap. 1).

4.1 Circuito principal de fuerza

Sobre la mayoría de las locomotoras que circulan en Europa, en la actualidad, utilizando la frecuencia industrial (50 Hz) y la tensión de 25 KV monofásico, el circuito principal de fuerza es parecido al mostrado en la figura 4.1.

El circuito principal de fuerza está constituido por los siguientes equipos y aparatos:

- Los pantógrafos (tomacorrientes) P1 y P2.
- Los separadores S1 y S2.
- El apartarrayos A.
- El interruptor principal IA,
- Los transformadores de medición y protección TM1 y TM2.
- El conmutador de puesta a tierra CP.

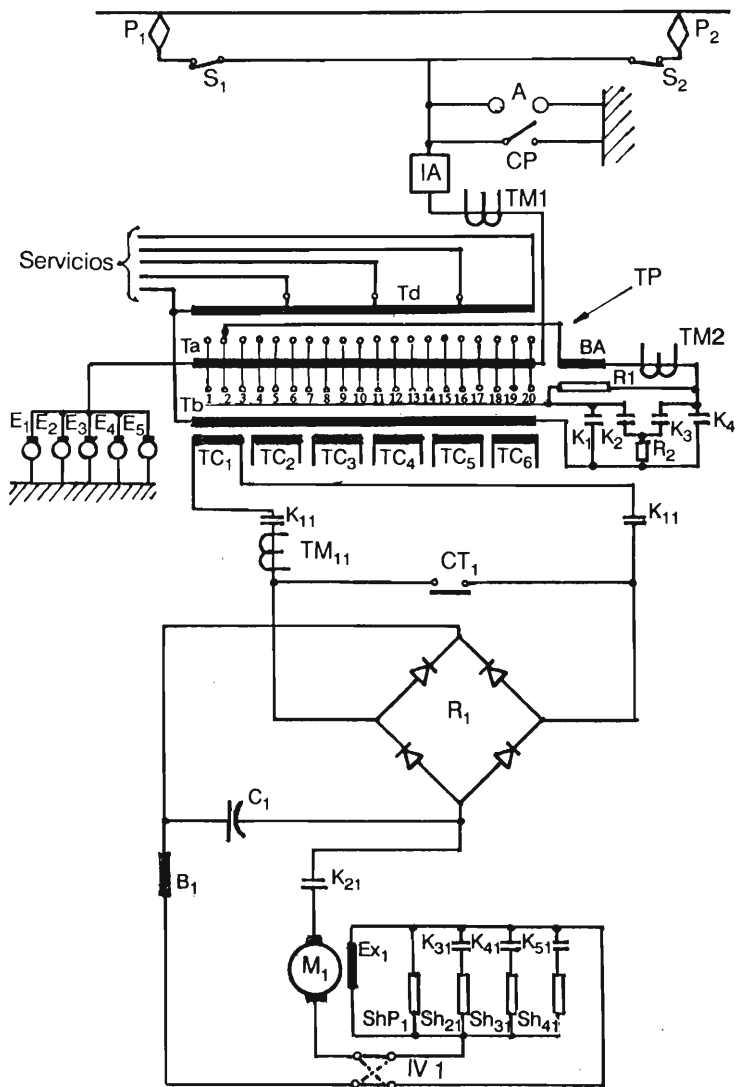


Fig. 4.1 Circuito principal de fuerza sobre una locomotora monocontinua.

- El transformador principal TP con múltiples devanados.
- Los puentes rectificadores R1, R2,...R6.
- Los contactores K11, K12...K16 y K21, K22...K26.
- Los transformadores de medición TM11, TM12,...TM16.
- Los cortacircuitadores CT1, CT2...CT6.
- Los condensadores C1, C2...C6.
- Las bobinas de alisamiento B1, B2....B6.
- Los motores de tracción M1, M2...M6.

El equipo para reducción de campo, compuesto por:

- El shunt permanente Sh1, Sh2,...Sh6.
- Las resistencias para disminuir el campo Sh21, Sh31, Sh41, Sh22, Sh32, Sh42,...Sh26, Sh36, Sh46.
- Los contactores para realizar el shunt del campo, K31, K41, K51, K32, K42, K52,...K36, K46, K56.
- Los inversores de marcha IV1, IV2,...IV6.
- Las escobillas en las puntas de los ejes de tracción $E_1, E_2, \dots E_6$ para el regreso de la corriente.

Se entiende que el circuito de fuerza para cada motor es idéntico y repetitivo con 4 o 6 ejes (B-B o C-C). El transformador principal TP tiene los siguientes devanados:

- Devanado primario Ta.
- Devanado primario de tracción Tb.
- 6 devanados secundarios de tracción, uno para cada circuito de fuerza (respectivamente para cada eje motriz). Tc1...Tc6.
- Devanado para servicios auxiliares provisto con varios taps de tensión. Td.

Un conjunto de elementos, nombrado graduador, compuesto de:

- Los contactores K_1, K_2, K_3, K_4 para los cambiadores de taps, (derivaciones).
- Las resistencias R_1 y R_2 las cuales sirven para disminuir la corriente de paso de un tap a otro.
- Una bobina auxiliar BA.

Con la enumeración del equipo principal de fuerza, resulta prácticamente, el funcionamiento del diagrama respectivo, presentado en la figura 4.1.

4.2. La rectificación y sus problemas

Con el desarrollo tecnológico alcanzado en el dominio de la fabricación de semiconductores, en la actualidad se utiliza, como solución generalizada, los diodos de silicio en los rectificadores de alta capacidad, sobre las locomotoras monofásicas.

Recordando algunas nociones de la física del átomo, el silicio es un elemento tetravalente, con el número 14 y en estado de pureza absoluta es un aislante.

Si en la red cristalina del silicio aparecen otros átomos (trivalentes o pentavalentes), el cristal puede aceptar o donar electrones, debido a la imperfección que aparece en dicha red cristalina.

La unión entre dos superficies de materiales de las cuales uno es de silicio puro (99.999999%) y otro de silicio con cierto grado de impureza controlada, constituye una pastilla semiconductor.

Entre las dos superficies se crea una barrera de potencial natural, con el signo dependiente de las impurezas de la segunda placa.

En la figura 4.2a se presenta la barrera de potencial creada en una pastilla rectificadora. Si aplicamos a las dos placas una diferencia de potencial, pueden ocurrir dos cosas: Si el signo de la tensión aplicada es el mismo que la carga espacial creada por la pastilla semiconductor, la diferencia de potencial aumenta, pero no hay flujo de carga eléctrica, más que una insignificante. La diferencia de potencial se llama tensión inversa y la corriente que circula, la llamamos corriente inversa.

Si el signo de la tensión aplicada es diferente a la carga espacial, las cargas se combinan creando así una corriente a través de la pastilla. La diferencia de potencial disminuye y la corriente en el circuito es notable. Llamamos a esta tensión directa y a la corriente que circula, corriente directa.

Los anteriormente dichos se pueden analizar en la figura 4.2b y c.

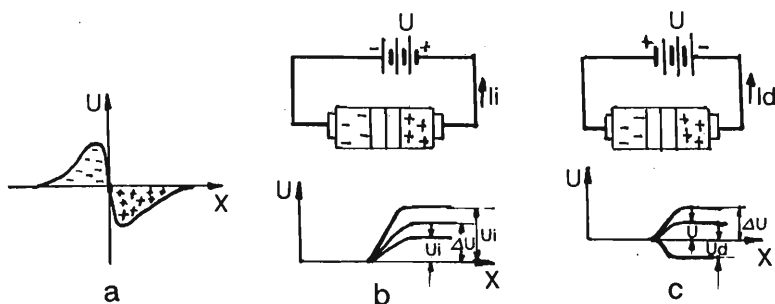


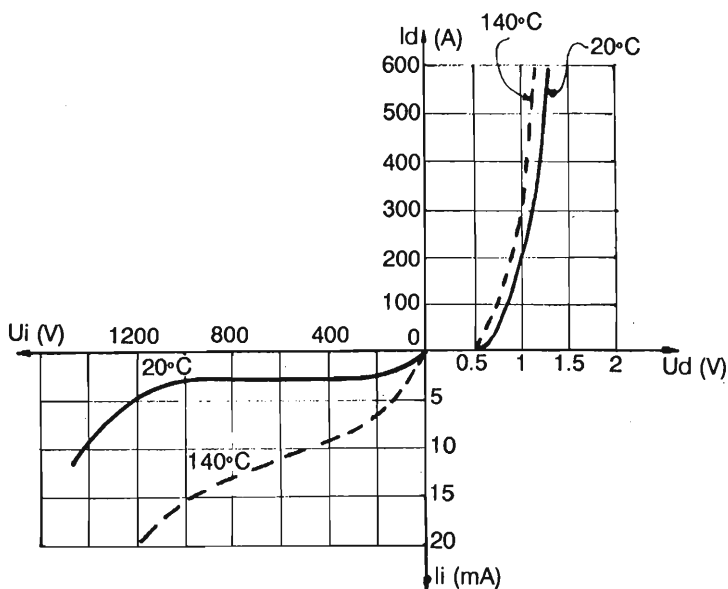
Fig. 4.2 Pastilla rectificadora. a- Barrera de potencial; b - Aplicación de tensión inversa; c- Aplicación de tensión directa.

4.2.1 Características corriente-tensión

Para un rectificador semiconductor, la curva corriente-tensión para uno y otro sentido representa el parámetro principal.

En la figura 4.3 se presenta la característica corriente-tensión típica para una pastilla semiconductora, de alta potencia a base de silicio.

Se puede hablar de dos curvas distintas para el sentido directo e inverso, pero generalmente se presentan en una misma gráfica. Se puede apreciar que la caída de tensión sobre la pastilla en el sentido directo es despreciable, mientras que la corriente toma valores muy altos. Aplicando la tensión en sentido inverso, la corriente es insignificante hasta un determinado valor de la tensión, cuando la corriente aumenta rápidamente.



La temperatura de la unión aumenta hasta que rebasa el límite de estabilidad térmica y la pastilla se destruye. La tensión inversa de operación debe estar lejos de este límite destructivo. Como existe

una diferencia pequeña de potencial sobre la pastilla en el sentido de conducción, significa una disipación de energía, la cual, por un lado introduce una pérdida de energía y de aquí una eficiencia, y por otro lado esta energía transformada en calor hace que suba la temperatura del elemento rectificador.

A la temperatura de operación, la característica corriente-tensión ya no es la misma que para 20°. Esta nueva característica se aprecia en la figura 4.3 dibujada con línea pausada. Se desprende que la operación de la pastilla rectificadora, instalada en un circuito de corriente alterna, deja pasar la corriente en un sólo sentido, resultando su nombre de válvula.

La fabricación práctica de las pastillas semiconductoras es un proceso elaborado y de alta precisión, requiriendo de técnicas y equipos muy especiales.

En la figura 4.4 se presenta una sección a través de una válvula rectificadora de silicio, donde los números significan: 1-electrodo inferior; 2- pastilla semiconductora; 3-electrodo superior; 4-cable flexible; 5-zapata; 6-aislante y 7-casco metálico con rosca.

Para poder disipar la energía almacenada en forma de calor, el casco se monta, a través de su rosca, sobre un soporte metálico, provisto de una gran superficie, llamado radiador.

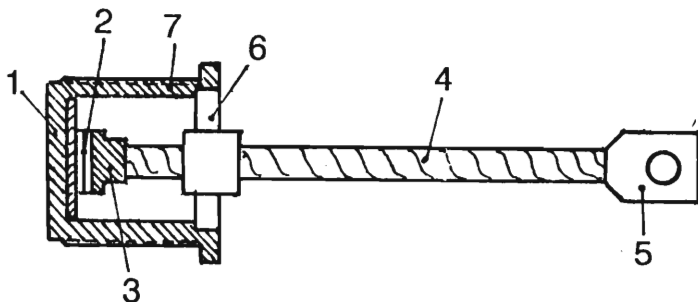


Fig. 4.4 Válvula rectificadora de silicio.

4.2.2 Parámetros principales de un diodo

Para la especificación de un diodo rectificador de alta potencia, se requiere de los siguientes parámetros, los cuales no deben rebasarse en la operación práctica.

- Corriente de pico (I_{dp}) definida como la amplitud de la corriente de trabajo en el sentido de la conducción. (Ver fig. 4.5.).
- Corriente promedio rectificada (I_d), definida como el promedio de la corriente de trabajo por un período. Es muy importante como se define esta corriente, si se refiere al promedio por un semiperíodo, o por un periodo completo (el error puede ser del sencillo al doble).

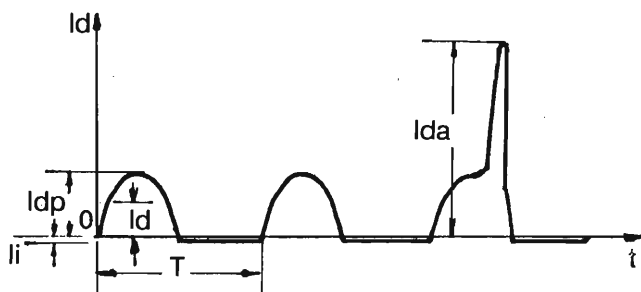


Fig. 4.5 Definición de las corrientes de un diodo.

- Corriente inversa, definida como la corriente que circula en el sentido contrario, cuando se aplica la tensión inversa (I_i).
- Corriente de pico de sobre carga accidental (I_{da}), definida como un impulso de corriente de muy corta duración. (Del orden de milisegundos), soportado por el diodo en régimen de corto circuito.
- Tensión directa de pico (U_{dp}) definida como la amplitud de la tensión senoidal, a la frecuencia de trabajo, medida a las terminales del diodo, en régimen de conducción. (Ver fig. 4.6).

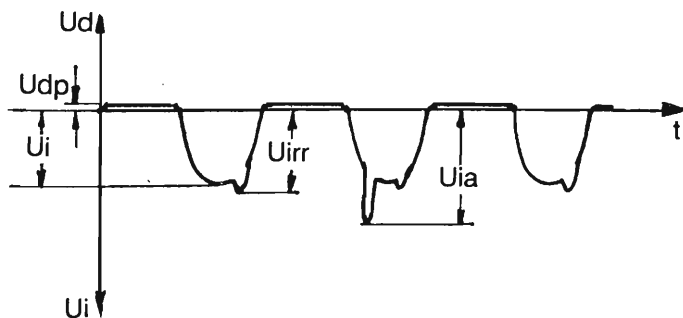


Fig. 4.6 Definición de las tensiones de un diodo.

Para diodo de silicio de alta capacidad, esta tensión tiene valores de 1 a 1.5V.

- Tensión inversa de pico de operación (U_{ip}), definida como la amplitud máxima que aparece periódicamente a las terminales del diodo. Este valor corresponde a la tensión que se aplica a la catenaria, (por supuesto, hay que considerar las relaciones de transformación), o sea;

$$U_{ip} = U_{max} = \sqrt{2} \cdot U \quad (4.1)$$

Por otro lado ya vimos que la tensión varía alrededor de su valor nominal, por ejemplo, para el caso de 25 KV, de la tabla 3.2 tenemos, como valor máximo 27.5 KV, de donde resulta un factor igual a $27.5/25 = 1.1$, el cual debe aplicarse para especificar la tensión inversa de trabajo, correspondiente al diodo.

- Tensión inversa repetitiva (U_{ivr}) definida como la amplitud máxima, incluyendo los picos causados por los fenómenos transitorios.

- Tensión inversa de pico accidental (U_{ia}), definida como el valor instantáneo más elevado, no repetitivo, situado en los límites de la destrucción.

En la figura 4.6 se presentan gráficamente las tensiones definidas en este párrafo.

En la tabla 4.1. se presentan los parámetros más importantes de algunos tipos de diodos a base de silicio.

4.2.3 La conexión serie y paralelo de los diodos

En las aplicaciones prácticas, los parámetros nominales de corriente y tensión no siempre se adaptan a los requerimientos, resultando la necesidad de conectar varios elementos en serie para aumentar la tensión, o varios elementos en paralelo, para aumentar la carga. Pero esta conexión implica algunos problemas.

Se mencionó que el proceso de fabricación es muy complejo. Tanto las pastillas, como los rectificadores acabados, presentan algunas diferencias (pequeñas) en sus características. En la conexión serie, la repartición de tensión inversa sobre cada uno de los elementos seriados es inversamente proporcional con la corriente inversa que cada elemento permite. El elemento que menos corriente inversa permite, será más solicitado a la tensión inversa, lo que podría rebasar su límite, provocando así su falla.

TABLA 4.1
DATOS CARACTERISTICOS DE ALGUNOS TIPOS
DE DIODOS DE POTENCIA

| PARAMETRO | SIM- BOLO | UNI- DAD | TIPO Y FABRICANTE | | | |
|--|--------------|-------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | | TU-38 IPRS RUMANIA | Si-12B SW FRANCIA | Si-B300 ASEA SUECIA | Si-A250 ASEA SUECIA |
| Corriente prome- dio rectificada | I_d | A | 350 | 200 | 350 | 300 |
| Corriente directa de pico (sobrecarga accidental 10 ms). | I_{da} | A | 5500 (a 25°C) | — | 6000 (a 100°C) | 4800 (a 100°C) |
| Tensión inversa pico de trabajo | U_{ip} | V | 1300 | 480 | 600 | 600 |
| Tensión inversa pico repetitivo | U_{ivr} | V | 1300 | — | 1000 | 1000 |
| Tensión inversa pico accidental | U_{ia} | V | 1800 | 1200 | 1500 | 1500 |

Por esta razón, en la conexión serie, la tensión inversa será afectada por un factor de 0.9 y además se crea un shunt con una resistencia de un valor de 2 a 3 Kohms, capaz de manejar una corriente de aproximadamente cinco veces la corriente máxima inversa admitido por un elemento (como elemento promedio). (Ver fig. 4.7).

En la conexión paralelo, la distribución de la carga sobre los elementos depende de la caída de tensión en sentido de conducción sobre cada elemento (U_d).

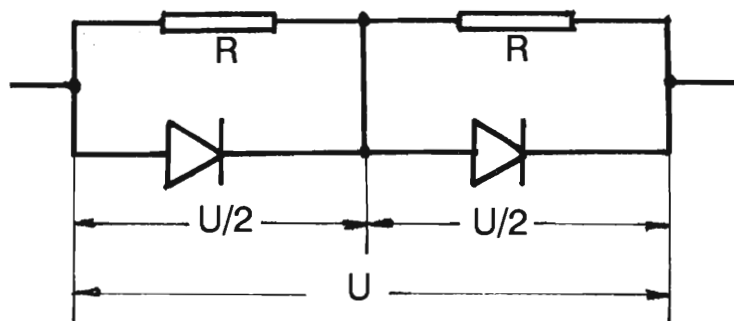


Fig. 4.7 Conexión serie de dos diodos.

Para resolver este problema, en un principio se introducía en serie con cada elemento una reactancia, pero en la actualidad se prefiere seleccionar muy atentamente los elementos instalados sobre el mismo ramal, que tengan la misma caída de tensión directa, admitiendo errores de 0.03...a...04 V, aplicando un factor que disminuye la carga de aproximadamente 20%, y asegurando un enfriamiento uniforme.

4.2.4. Diagramas de conexión de los diodos

El diodo en un circuito de corriente alterna rectifica solamente la mitad, es decir, deja pasar en un solo sentido. En utilizaciones de potencia se requiere rectificar las dos alternancias. Se utilizan principalmente dos esquemas de conexión para este efecto.

En la figura 4.8a se presenta el montaje "Push-pull" o con punto mediano y en la figura 4.8b se presenta el montaje en puente. Sobre los esquemas presentados se puede comentar los siguientes:

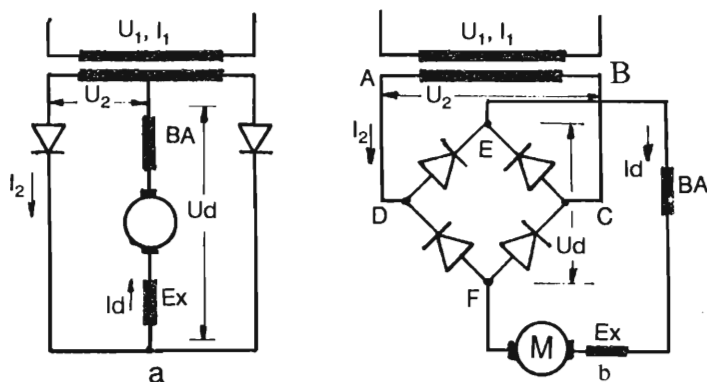


Fig. 4.8 Diagramas de conexión de los diodos; a - conexión "push pull"; b - conexión en "puente".

- A través del motor circulan ambas alternancias en el mismo sentido,
- En el montaje "push-pull" se utilizan solamente dos diodos, pero el devanado secundario del transformador maneja, cada mitad hasta el punto mediano, una mitad de la corriente. Se hacen las siguiente anotaciones:

- U_1, I_1 = valores eficaces en el primario del transformador.
- u_2, i_2, U_2, I_2 = valores instantáneas, respectivamente eficaces en el secundario del transformador.
- u_d, i_d, U_d, I_d = valores instantáneos, respectivamente promedio, en el circuito del motor.

Se consideran las siguientes aproximaciones:

- despreciar la reactancia del transformador (considerar que $X_t = X_p + X_s = 0$).
- despreciar la caída de tensión sobre el rectificador ($\Delta R = 0$)
- considerar que el valor de la reactancia de la bobina de alisamiento es infinita (BA).

Con las anotaciones y aproximaciones hechas, en la figura 4.9 se presentan gráficamente, los valores de corriente y tensión en los tres circuitos del diagrama y se deducen los siguientes:

- tensión promedio rectificada.

La tensión aplicada al rectificador es de forma:

$$u = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \quad (4.2)$$

A la salida del rectificador (U_d) tendremos una sucesión de alternancias positivas de la misma forma. Calculando por medio de la integración resulta la tensión promedio rectificada.

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \, d(\omega t) =$$

$$\frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \left[-\cos \omega t \right]_0^{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (-\cos \pi + \cos 0) \quad (4.3)$$

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2$$

Considerando la relación 4.1 resulta que

$$U_d = \frac{2}{\pi} U_{max} \quad (4.4)$$

En cuanto a la corriente rectificada, ésta depende de la carga conectada. En el caso que la carga sería puramente resistiva, la forma de corriente sería idéntica a la forma de onda de la tensión. Como hicimos la suposición que el valor de la inductancia es infinita, la corriente ($i_d = I_d$) será prácticamente continua.

Como la impedancia del circuito tiene un valor finito (BA más la impedancia del motor) la corriente rectificada tendrá una forma

intermedia entre los dos extremos: (una componente pulsatoria de semialternancias senoidales y una componente continua). Esta forma se conoce como corriente ondulatoria. (Ver fig. 4.10).

- Potencia típica del transformador (P_t).

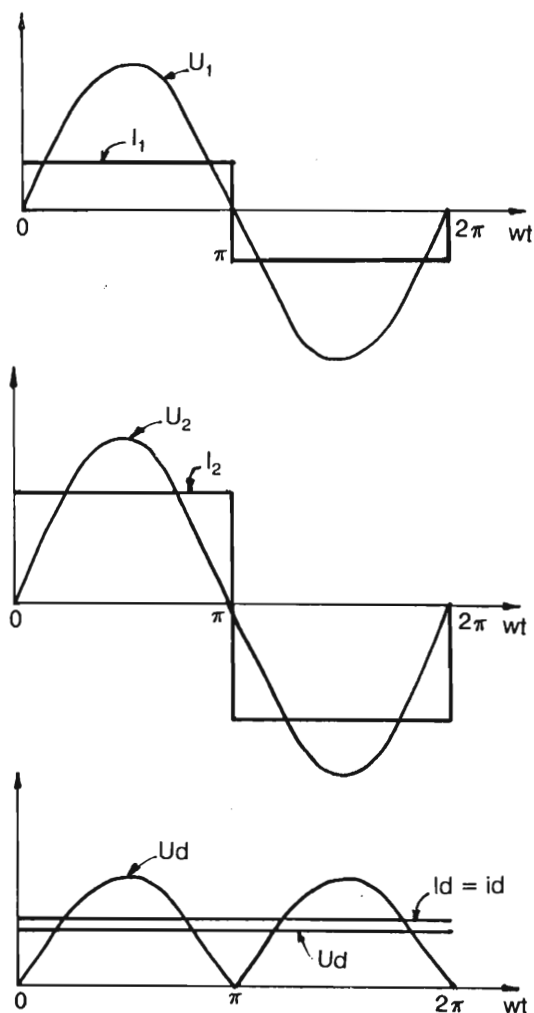


Fig. 4.9 Curvas de voltaje y corriente en el circuito de rectificación.

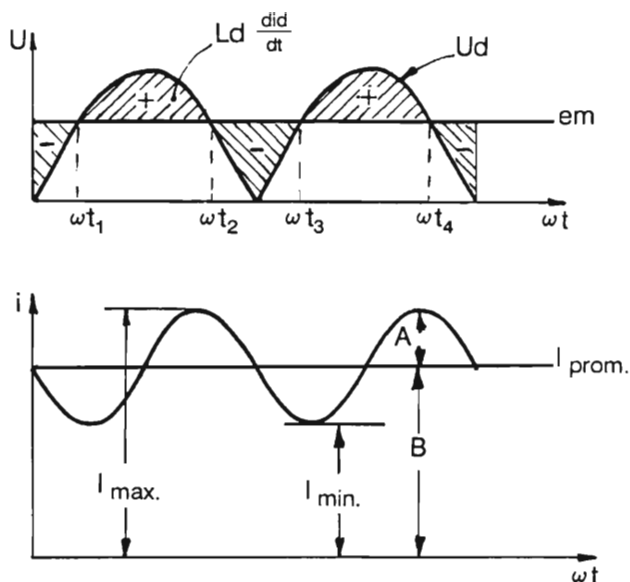


Fig. 4.10 Los voltajes en el circuito rectificador-motor y la corriente ondulatoria.

Esta es una magnitud convencional, específica para el transformador de rectificador, definida como la semisuma de las potencias aparentes del primario (P_1) y secundario (P_2).

$$P_t = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (4.5)$$

Para comparar los dos tipos de montaje, veremos primeramente el montaje en puente (fig. 4.8b).

- Potencia rectificada

$$P_d = U_d I_d \quad (4.6)$$

- Potencia aparente en el secundario

$$P_2 = U_2 I_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d I_2 = 1.11 P_d \quad (4.7)$$

(considerando 4.4 $I_2 = I_d$)

- Potencia aparente en el primario

$$P_1 = U_1 I_1 = K_t U_2 \frac{I_2}{K_t} = 1.11 P_d \quad (4.8)$$

Resultando la potencia típica del transformador

$$P_t = \frac{1.11 P_d + 1.11 P_d}{2} = 1.11 P_d \quad (4.9)$$

Para el montaje “push-pull” (fig. 4.8a) tenemos:

- Una alternancia pasa solamente por la mitad del devanado, mientras la otra mitad no maneja corriente alguna. El valor eficaz para todo el devanado secundario será:

$$I_2 = \sqrt{\frac{I_d^2 \pi + o^2 \pi}{2\pi}} = \frac{I_d}{\sqrt{2}} \quad (4.10)$$

- La potencia rectificada

$$P_d = U_d I_d \quad (4.11)$$

- La potencia aparente en el secundario (viendo la figura 4.8a)

$$P_2 = 2 U_2 I_2 = 2 \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d \frac{I_d}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2} P_d = 1.57 P_d \quad (4.12)$$

En el primario, la potencia aparente será igual que en 4.8.
La potencia típica del transformador será:

$$P_t = \frac{1.11 P_d + 1.57 P_d}{2} = 1.34 P_d \quad (4.13)$$

De aquí se puede apreciar que el secundario está mal utilizado, conduciendo a un sobredimensionamiento del transformador para la misma potencia del rectificador P_d . Para el montaje “push-pull” resulta $P_t = 1.34 P_d$ y para “puente” $P_t = 1.11 P_d$.

El aumento de peso será mayor con aproximadamente 10 a 15% del primero, con respecto al segundo, contra la utilización de un número doble de diodos rectificadores del segundo montaje, con respecto al primer montaje.

Generalmente se considera mayor la ventaja del montaje en puente, por lo cual se prefiere en el caso de las locomotoras eléctricas.

- Tensión inversa aplicada sobre un elemento rectificador.

En el caso del montaje “push-pull” la tensión inversa es “doble”, mientras que para el montaje puente, es el valor sencillo del secundario del transformador.

Para el montaje puente:

$$U_{imax} = \sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d = \frac{\pi}{2} U_d \quad (4.14)$$

Para el montaje “push-pull”

$$U_{imax} = 2\sqrt{2} U_2 = \pi U_d \quad (4.15)$$

Si en el montaje “push-pull” se reduce el número de elementos rectificadores, como número de colocaciones, resulta necesario duplicar el número de elementos debido a la tensión inversa, lo que conduce a una ventaja neta a favor del montaje en puente, caso generalizado en la práctica, el cual se considerará a continuación en este libro.

4.2.5 La conmutación de la corriente

Considerando el caso real, con la reactancia del transformador ($X_t \neq 0$), el cambio de operación de un brazo del puente al otro, respectivamente de una alternancia a otra, no se realiza de manera instantánea, sino en un tiempo finito (τ), llamado “tiempo de conmutación” del rectificador.

Si expresamos este tiempo como valor eléctrico angular encontramos el “ángulo de conmutación”.

$$\gamma = \omega \tau \quad (4.16)$$

el cual caracteriza el fenómeno de conmutación del rectificador.

Para explicar este fenómeno, se debe considerar la autoinducción en el circuito transformador-rectificador, que prolonga la conducción de la corriente en el ramal que ya condujo (reduciéndose a cero) mientras que en el ramal que empieza a conducir, este valor aumenta paulatinamente desde cero.

En este tiempo, cuando las dos ramas conducen, se puede decir que el rectificador está cortocircuitado (la diagonal C - D en la figura 4.8b), resultando que la tensión rectificada tiene el valor cero.

Con la hipótesis hecha de que la bobina de alisamiento tiene un valor ilimitado en la figura 4.9, se presentan gráficamente las corrientes y las tensiones en los circuitos secundario-rectificador y rectificador-motor.

A continuación se calculan las siguientes magnitudes:

- tensión promedio rectificada,

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\gamma}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \operatorname{sen} wt d(wt) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (1 + \cos \gamma) \quad (4.17)$$

Resulta que la tensión rectificada depende del ángulo de conmutación. Si $\gamma=0$, la relación 4.17 sería la misma que 4.3.

- Ángulo de conmutación.

Sobre el circuito cerrado ABCED (o ABCFD), se aplica la ecuación de la tensión. (Ver fig. 4.8b).

$$e_2 - l_2 \frac{di_2}{dt} = 0 \quad (4.18)$$

ó

$$-\sqrt{2} U_2 \operatorname{sen} wt = l_2 \frac{di_2}{dt} \quad (4.19)$$

de donde resulta:

$$-\frac{\sqrt{2}}{l_2} U_2 \operatorname{sen} wt dt = di_2 \quad (4.20)$$

En este circuito, la corriente varía desde:

- I_2 hasta $+ I_2$, en el tiempo correspondiente al ángulo eléctrico

γ .

Por integración se obtiene:

$$-2I_2 = \int_0^{\tau} \left(-\frac{\sqrt{2}}{l_2} U_2 \operatorname{sen} wt dwt \right) = \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega l_2} |\cos wt|_0^{\tau}$$

de donde resulta:

$$\cos \gamma = 1 - \frac{2l_2 \omega I_2}{\sqrt{2} U_2} \quad (4.21)$$

Anotando:

$$I_2 w = X_2 = m^2 X_1$$

Donde:

X_2 = reactancia total del transformador vista desde el lado secundario.

X_1 = idem, pero vista desde el primario. m = relación de transformación.

Introduciendo el valor $\cos \gamma$ en la relación 4.17 encontramos:

$$U_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} \left(2 - \frac{2X_1}{m^2} \cdot \frac{I_2}{\sqrt{2} U_2} \right) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 - \frac{2X_1 I_2}{\pi m^2} \quad (4.22)$$

Si tomamos en consideración todas las caídas de tensión, considerando n motores en paralelo sobre el rectificador, la tensión en las terminales de los motores se calcula con la siguiente relación:

$$U_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 - \Delta U_r - \left(\frac{n}{\pi} \cdot \frac{2X_1}{m^2} + nR_2 + R_{BA} \right) I_m \quad (4.23)$$

En donde, además de las anotaciones introducidas anteriormente se anotó:

n = número de motores

ΔU_r = caída de tensión sobre el rectificador.

U_2 = valor eficaz, en vacío, en el secundario, para la relación de transformación m .

R_2 = la resistencia total del transformador, vista desde el lado del secundario.

R_{BA} = la resistencia de la bobina de alisamiento.

En el caso que el transformador disponga de otro devanado, situación general sobre las locomotoras con regulación de voltaje en alta tensión (ver fig. 4.1), es válida la misma relación haciendo la aclaración que:

m = es la relación de transformador global entre el devanado de regulación y el secundario,

X_1 = reactancia total del transformador, vista desde el devanado de regulación.

4.2.6 La operación del rectificador, alimentando un motor

Analizaremos ahora el circuito de corriente directa (FMECF fig. 4.8b).

En este circuito tenemos el motor que desarrolla una tensión contra electromotriz e_m , y una inductancia L_d . Aplicando la segunda ley de Kirchoff, resulta:

$$u_d = e_m + R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \quad (4.24)$$

Donde :

e_m = tensión contraelectromotriz, desarrollada por el motor.

R_d = resistencia total del circuito.

L_d = inductancia total del circuito (el motor y la bobina de alisamiento).

Si la caída de tensión $R_d i_d$ que tiene un valor relativamente pequeño, se desprecia, la relación anterior queda en la forma:

$$L_d \frac{di_d}{dt} = u_d - e_m \quad (4.25)$$

En la hipótesis que tenemos una conmutación instantánea ($\gamma=0$) y el motor trabaja en un régimen cuasiestacionario, (e_m = constante), la representación gráfica de la ecuación anterior se presenta en la figura 4.10.

Las superficies sombreadas representan precisamente la tensión electromotriz auto inducida en el circuito de corriente directa $L_d \frac{di_d}{dt}$ y el signo de este término, varía con el tiempo (ωt), siendo determinado del signo de la derivada $\frac{di_d}{dt}$ (dado que L_d = constante).

- Cuando $U_d > e_m$; $L_d \frac{di_d}{dt} > 0$

la inductancia del circuito almacena energía.

- Cuando $U_d < e_m$; $L_d \frac{di_d}{dt} < 0$

la respectiva inductancia libera energía.

- En los puntos de intersección, $U_d = e_m$, o sea, la derivada es cero ($L_d \frac{di_d}{dt} = 0$) y la función (i_d) presenta un máximo o un mínimo (en la gráfica corresponden los momentos $\omega t_1, \omega t_2, \omega t_3$, etc).

Como consecuencia, la corriente que circula a través del motor no es constante sino ondulatoria.

Del diagrama se aprecia que la ondulación no depende de la corriente de carga, sino de los valores U_d y e_m , como también de la forma de variación de los mismos.

La diferencia $I_{maz} - I_{min}$ define la ondulación absoluta de la corriente e influye directamente, de manera negativa, sobre la operación del motor (sobrecalentamiento y problemas suplementarios en la conmutación).

Se acostumbra que la ondulación de la corriente sea expresada por el "factor de rizo" (β), definido con la siguiente relación (ver fig. 4.10):

$$\beta = \frac{A}{B} = \frac{\frac{I_{maz} - I_{min}}{2}}{\frac{I_{maz} + I_{min}}{2}} = \frac{I_{maz} - I_{min}}{I_{maz} + I_{min}} \quad (4.26)$$

Este coeficiente se expresa en porcentaje de la corriente nominal I_n , y mientras menor sea la ondulación, mejor será la operación del motor.

El alisamiento total de la onda se producirá para un valor infinito de la inductancia L_{BA} .

Como en la práctica trabajamos con valores reales, se utiliza una bobina de peso y costo convenientes, capaz de asegurar un factor de rizo aceptable para la operación del motor.

En la construcción del motor se considera el valor del factor de rizo. El valor eficaz de la corriente en los distintos circuitos, se calcula como sigue:

- Valor eficaz de la corriente rectificada.

Esta corriente consta de una componente directa (I_{prom}), sobre la cual se sobreponen la componente alterna de la frecuencia base (100 o 120 Hz) y las armónicas de orden superior.

El valor eficaz se calcula con la suficiente aproximación, considerando solamente el valor promedio (I_{prom}) y la componente alterna fundamental (frecuencia 100 o 120 Hz) (I_{2f}).

En la figura 4.10 se presenta la forma de onda de esta corriente. El valor promedio cuadrático, de la corriente rectificada será:

$$I_{def} = \sqrt{I_{prom}^2 + I_{2f}^2} \quad (4.27)$$

Introduciendo el factor de rizo en la relación 4.27, resulta:

$$\beta = \frac{I_{max} - I_{min}}{2 I_{prom}} = \frac{\sqrt{2} I_{2f ef}}{I_{prom}} \quad (4.28)$$

Se tuvo en consideración que:

$$I_{max} - I_{min} = 2 i_{2f max} \quad y \quad (4.29)$$

$$I_{2f ef} = \sqrt{2} I_{2f max} \quad (4.30)$$

De donde resulta:

$$I_{2f ef} = \frac{\beta}{\sqrt{2}} I_{prom} \quad (4.31)$$

Introduciendo este valor en la relación 4.27 nos conduce a:

$$I_{def} = I_{prom} \sqrt{1 + \frac{\beta^2}{2}} \quad (4.32)$$

relación que se puede expresar con suficiente aproximación, en la forma siguiente:

$$I_{def} = I_{prom} \left(1 + \frac{\beta^2}{4}\right) \quad (4.33)$$

- Valor eficaz de la corriente en el secundario del transformador. Para el montaje en puente, el valor eficaz del secundario del transformador es el mismo que el valor eficaz del circuito de corriente directa.

$$I_2 = I_{def} = I_{prom} \left(1 + \frac{\beta^2}{4}\right) \quad (4.34)$$

- Valor eficaz de la corriente en el primario del transformador. Si el factor de transformación entre los dos devanados tiene el valor m, el valor eficaz de la corriente en el primario del transformador será:

$$I_1 = \frac{I_2}{m} = \frac{1}{m} I_{prom} (1 + \frac{\beta^2}{4}) \quad (4.35)$$

- El factor de potencia del circuito de tracción. Se define el factor de potencia del circuito de tracción como:

$$\cos\phi = \frac{P}{P_a} \quad (4.36)$$

en donde:

P = la potencia activa medida a la entrada del transformador. (Sin tomar en consideración los servicios auxiliares).

P_a = la potencia aparente en la entrada del transformador.

La potencia activa para n motores, será:

$$P = U_d \cdot n \cdot I_{mot} = \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 - \frac{2X_1}{\pi m^2} \cdot n \cdot I_{max} \right) n \cdot I_{mot} \quad (4.37)$$

(se utilizó la relación 4.22).

y la potencia aparente será:

$$P_a = U_1 \cdot I_1 \quad (4.38)$$

Haciendo uso de la relación 4.33, del factor de transformación m y considerando un factor de rizo del orden de $\beta=0.25$ (valor usual) (para el cual se puede aproximar: $1 + \frac{0.25^2}{4} \cong 1$).

resulta:

$$P_a = m U_2 \cdot \frac{n \cdot I_{mot}}{m} = U_2 n I_{mot} \quad (4.39)$$

con las relaciones 4.28 y 4.30 introducidas en 4.27, resulta:

$$\cos\phi = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} - \frac{2X_1}{\pi m^2} \cdot \frac{n I_{mot}}{U_2} \quad (4.40)$$

La curva de variación del factor de potencia, con respecto a la velocidad de la locomotora, para un caso práctico, se presenta en la figura 4.11.

Se aprecia que en el dominio de las velocidades usuales el valor del factor de potencia es alrededor de 0.8.

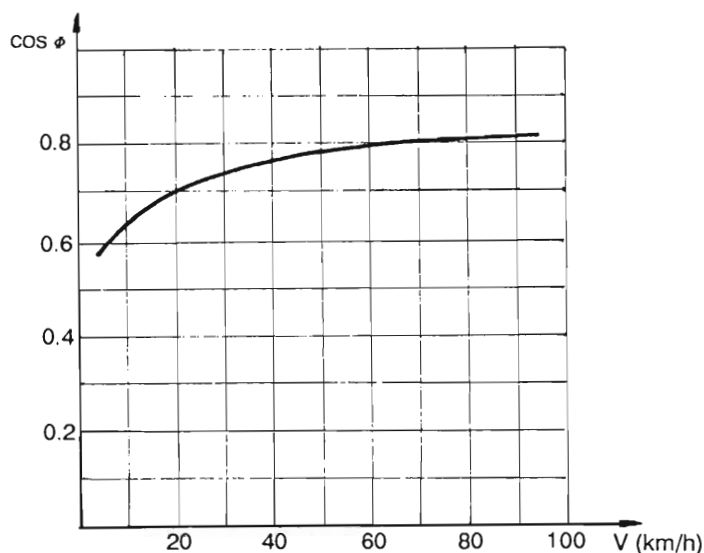


Fig. 4.11 El factor de potencia de una locomotora, función de su velocidad.

4.2.7 Cálculo del número de celdas para un rectificador en puente

Generalmente los parámetros de los diodos no corresponden con los parámetros requeridos para el puente rectificador de una locomotora, donde se requiere mayor tensión inversa y mayor corriente ramal, requiriéndose las conexiones en serie y en paralelo de los diodos rectificadores.

En la figura 4.12 se presenta esquemáticamente el circuito de un puente rectificador. El cálculo del número de celdas rectificadores se hace, sabiendo que los diodos (celdas) no soportan ni sobretensiones, ni sobrecargas, por lo cual se considerarán los valores de pico.

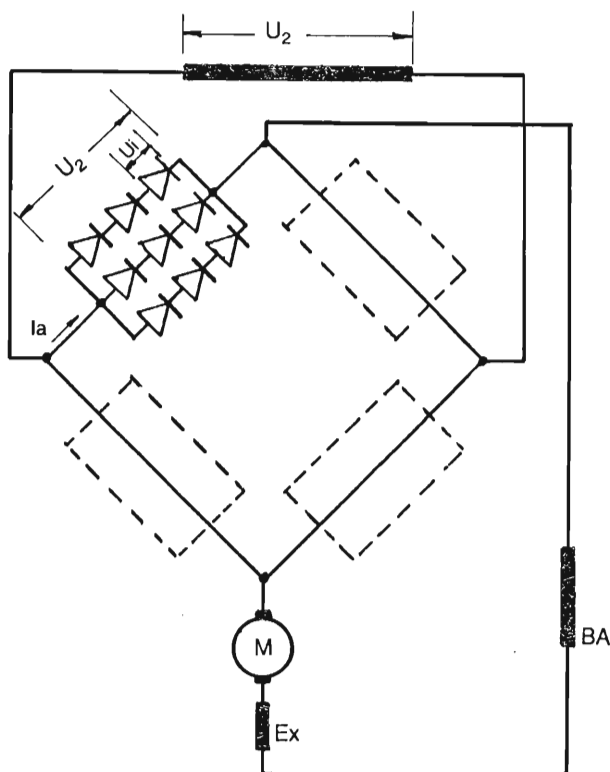


Fig. 4.12 Diagrama para la composición de la unidad rectificadora.

Se hacen las siguientes anotaciones:

I_a - corriente máxima de arranque de un motor (si se desconoce el valor, este se puede aproximar de 1.75 a 1.85 I_n).

I_d - corriente promedio rectificada del diodo (celda). (Se aclara que si el diodo maneja una corriente I_d por ciclo completo, manejará 2 I_d por un semiciclo).

U_2 - valor eficaz de la tensión del secundario del transformador, correspondiente a la tensión nominal del motor.

U_{ivr} - tensión inversa repetitiva sobre el diodo.

K_i - coeficiente de seguridad para la corriente ($k_i = 1.2$ a 1.5).

K_u - coeficiente de seguridad para la tensión ($K_u = 2$ a 3.5).

Los coeficientes K_i y K_u cubren los riesgos por conectar en paralelo, respectivamente en serie, los diodos. (Ver el párrafo 4.2.3).

n_p - el número de los elementos en paralelo sobre un ramal del puente, para cubrir la carga.

n_s - el número de los diodos en serie, para cubrir la tensión inversa.

Con estas notaciones definidas, para el cálculo de los diodos se utilizan las siguientes relaciones:

$$n_p = k_i \frac{I_a}{2I_d} \quad (4.41)$$

$$n_s = k_u \frac{\sqrt{2}U_2}{U_{ivr}} \quad (4.42)$$

Se recuerda que un ramal del puente maneja la corriente solamente un semiciclo, por lo cual se tomó $2 I_d$. Para el valor eficaz de la tensión secundaria U_2 , se utiliza la relación:

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.9U_2 \quad (4.43)$$

o sea:

$$U_2 = \frac{U_d}{0.9} = \frac{U_m \cdot \text{nom}}{0.9} \quad (4.44)$$

El valor del pico será $\sqrt{2} \cdot U_2$.

No se considera la conmutación.

Ejemplo de cálculo:

$$I_a = 2000 \text{ A}$$

$$U_{nom} = 770 \text{ V}$$

El diodo de silicio disponible, tiene las siguientes características:

$$I_d = 300 \text{ A (por un ciclo completo)}$$

$$U_{ivr} = 1300 \text{ V}$$

Haciendo uso de las relaciones 4.41, 4.42 y 4.44, el número de diodos será:

$$n_p = 1.2 \frac{2000}{2.300} = 4 \text{ elementos en paralelo}$$

$$n_s = 3 \cdot \frac{\sqrt{2.770}}{0.9.1300} = 2.79 \cong 3 \text{ diodos en serie.}$$

Para todo el rectificador se requieren:

4 ramas x 3 elementos serie x 4 elementos en paralelo = 48 diodos.

4.2.8 Protección de los rectificadores en puente

El rectificador a base de silicio presenta importantes ventajas (eficiencia, seguridad en operación, mínimo de refacciones), pero presenta también algunas desventajas, de las cuales las más importantes son: la capacidad de sobrecarga muy reducida y la sensibilidad a las sobretensiones de pico.

Por esta razón el cálculo del rectificador se realiza para la carga máxima que puede aparecer en el circuito y que en el circuito no deben aparecer tensiones superiores a las consideradas en dicho cálculo.

El diodo se compone de varias partes, como se ve en la figura 4.4. La variación de la temperatura, de un régimen de carga a otro, es una curva exponencial.

La pastilla, elemento de una masa mínima, tiene una constante de tiempo del orden de 0.001 s.

Los electrodos y el casco tienen una capacidad térmica mayor, por lo cual la constante térmica de este conjunto, es el orden de 0.1 a 0.2 s.

El radiador, que a la postre representa el elemento de intercambio de calor y el cual determina la carga de régimen, tiene una constante térmica del orden de 100 s.

Debido a estas constantes de tiempo, la sobrecarga del diodo resulta muy limitada.

En la figura 4.13 se presenta la característica de sobrecarga accidental, propia para un diodo de silicio, con una corriente promedio (un periodo) de 350 A. La curva llena corresponde al arranque desde frío (25°C) y la curva pausada, al régimen de operación (100°C). Se presenta la temperatura del casco.

En operación sobre la locomotora pueden aparecer sobretensiones y sobrecargas, para lo cual, el rectificador y sus diodos deberán estar protegidos, para no dañarse.

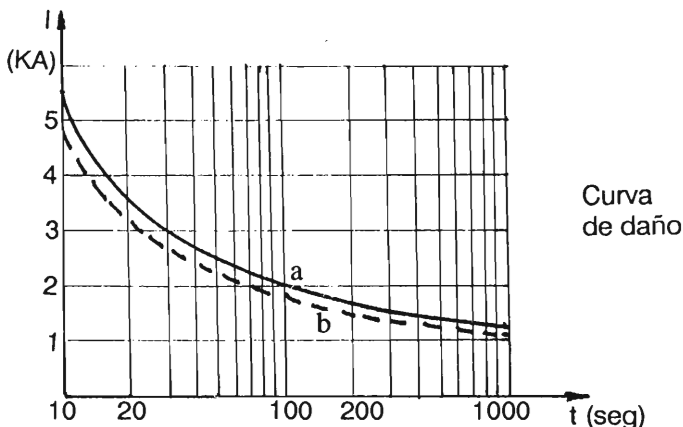


Fig. 4.13 Característica típica de sobrecarga para un diodo de silicio; a - arranque en frío (25°C); b- arranque en caliente (100°C).

4.2.8.1 Protección contra sobretensiones

Las sobretensiones pueden tener varios orígenes, como son: sobretensiones de conmutación del rectificador, sobretensiones de operación (switcheo) y sobretensiones de origen atmosférico.

Las últimas dos, bien conocidas, son externas al rectificador y se pueden prever protecciones convencionales para evitar sus efectos nocivos (apartarrayos).

Las sobretensiones de conmutación se deben al siguiente fenómeno; cuando se realiza el cambio del estado de conducción al estado de no conducción, la corriente continúa circulando y en el sentido contrario un tiempo extremadamente corto, el cual se reduce rápidamente a un valor muy bajo.

Resulta una sobretensión de tipo:

$$e = L \frac{di}{dt} \quad (4.45)$$

llamada de conmutación, la cual puede llegar hasta tres veces la tensión inversa de pico.

Este fenómeno se muestra en la figura 4.14 y puede presentarse como una oscilación amortizada.

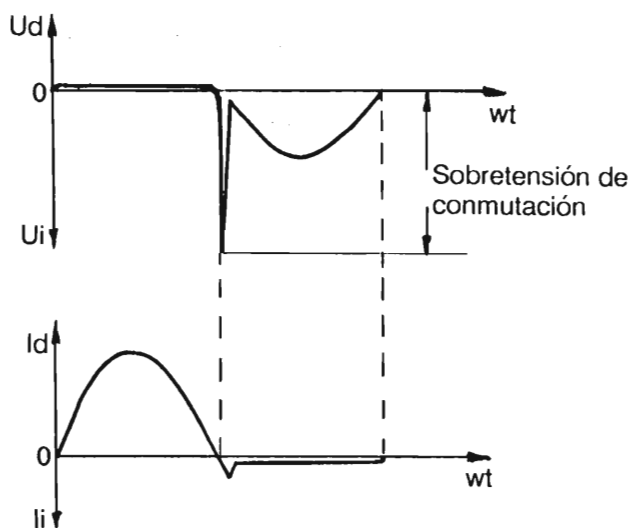


Fig. 4.14 Sobretensión de conmutación de un diodo.

Para evitar las oscilaciones se instala en paralelo con el diodo, un circuito formado de una resistencia y un capacitor, elementos que a la vez limitan, también la tensión de conmutación. (Se instala como otro ramal en paralelo, en la figura 4.7).

4.2.8.2 Protección contra sobrecorrientes

Las corrientes peligrosas tienen dos orígenes: sobrecarga de la locomotora o algún corto circuito, que a su turno se debe a alguna falla.

La protección contra corrientes peligrosas se realiza de varias maneras:

a) Protección con fusibles.

La colocación de los fusibles en el circuito se puede realizar en tres formas (ver fig. 4.15): (a) fusible independiente por cada ramal; (b) fusibles en el circuito de corriente alterna y (c) un fusible en el circuito de corriente alterna y un fusible en el circuito de corriente directa.

Los fusibles utilizados son de construcción especial (tiempos muy cortos, tensión de arco reducida y bajas pérdidas); al seleccionar

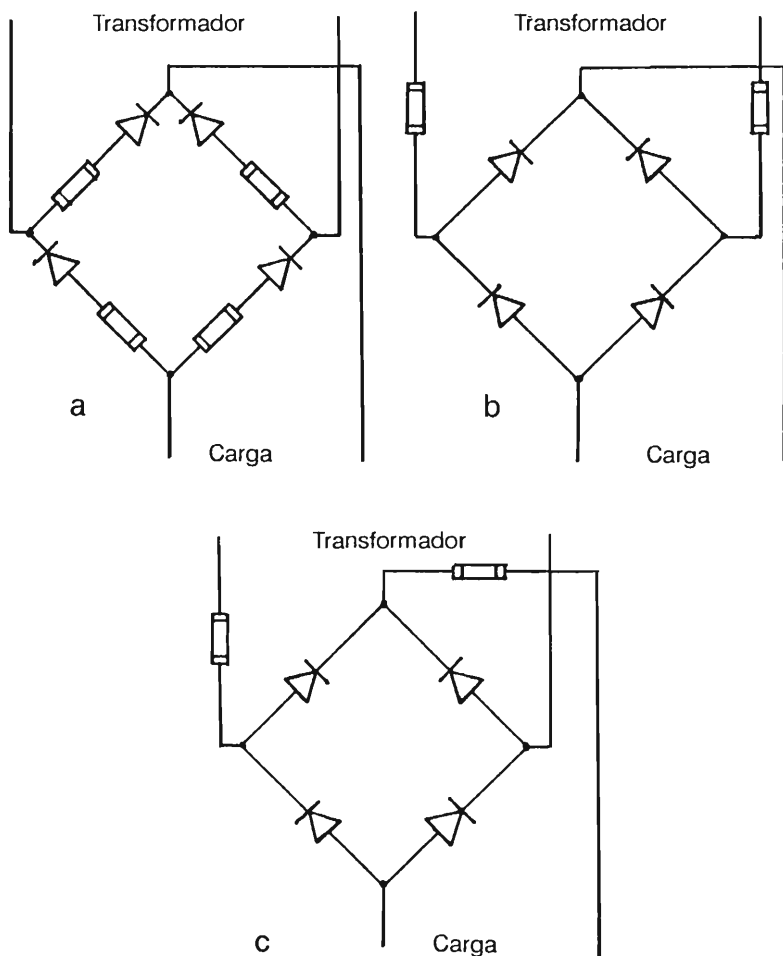


Fig. 4.15 Protección del rectificador por fusibles; a- fusible en cada rama; b- fusibles en el circuito de C.A.; c- un fusible en C.A. y un fusible en C.D.

los fusibles se debe tener mucho cuidado con las curvas de disparo, especialmente para sobrecargas.

b) Protección por cortocircuitador.

Este método basa su operación en el uso de unos transformadores de impulso, colocados tanto en el circuito de corriente alterna como

en el circuito de corriente directa, los cuales al emitir una señal, se dispara un contacto especial, que pone en corto-circuito el devanado secundario del transformador, en un tiempo de aproximadamente 0.002 s.

El impulso de disparo se origina debido a que, sea que la corriente rebasa el límite admitido, sea debido a que la velocidad de aumento de la corriente rebasa el límite calibrado de crecimiento en alguno o varios de los elementos sensores (transformadores de impulso).

c) Protección con el interruptor principal.

Debido a que aparecen elementos rectificadores con parámetros cada día más elevados, existe la tendencia de eliminar los dispositivos de protección intermedia, reduciendo la protección solamente al interruptor principal, el cual deberá ser de tiempo ultra rápido.

Esto supone realizar un cálculo de cortocircuito muy preciso y considerar las peores circunstancias.

La corriente de cortocircuito resultante y el tiempo de disparo se deben comprar contra la característica del diodo (cuyo ejemplo se muestra en la figura 4.13).

4.3 El motor de tracción de corriente ondulatoria

La tensión rectificada a la cual se conecta el motor de tracción tiene una forma pulsatoria (Ver fig. 4.10) y la corriente que circula a través del motor es una corriente ondulatoria.

La tensión puede considerarse como compuesta de dos componentes; una continua cuyo valor promedio es dado por la relación 4.17 y una alterna senoidal de frecuencia $2f$ (donde f es la frecuencia de la red). Para cálculos se considera la senoidal de base, desconsiderando las armónicas de orden superior.

En el caso de los rectificadores con diodos (no con tiristores) en base a datos experimentales, se puede aproximar.

$$U_{max} = (1.85 \dots 1.95) U_{prom} \quad (4.46)$$

De la misma manera, la corriente se considera compuesta, de una componente directa I_{prom} y la senoide fundamental de la componente alterna de frecuencia $2f$, desconsiderando las armónicas de orden superior. Esta componente alterna crea algunos problemas, que actúan desfavorablemente sobre la operación del motor (sobrecalentamiento, conmutación más pesada, estabilidad, regímenes transitorios).

La componente alterna de la corriente, circulando por el devanado de los polos principales (suponiendo el motor tipo serie) crea una componente alterna del flujo, que induce en el devanado de armadura una f.e.m. de origen transformador, la cual produce los fenómenos desfavorables enumerados.

Estos efectos son cuantificables con respecto al factor de rizo definido por la relación 4.26 y 4.28, el cual, a su turno depende de la bobina de alisamiento.

Experimentalmente se constató que este valor deberá considerarse en el rango 25 a 30% al régimen nominal, definido para el motor.

Con este dato establecido se puede proceder a la especificación, tanto del motor, como de la bobina de alisamiento.

4.3.1 Método para eliminar el flujo pulsatorio

Para eliminar parcialmente el flujo pulsatorio se conecta una resistencia en paralelo (shunt), con el campo. Se desvía así aproximadamente un 10% de la corriente total, obligando la componente alterna a pasar casi en su totalidad a través de la resistencia en derivación.

Cabe mencionar que este método disminuye la inductancia total del circuito (prácticamente elimina la inductancia del motor, quedando solamente la bobina de alisamiento), cosa que no representaría gran desventaja e introduce una fuente de pérdidas sobre esta resistencia.

4.3.2 Aislamientos para motores de corriente ondulatoria

En la técnica constructiva de los motores de corriente ondulatoria existe la tendencia hacia clases de aislamiento de temperatura elevada (F y H). (Ver el párrafo 3.2.3).

Comparativamente, para las mismas dimensiones y el mismo peso de motor, la clase H de aislamiento permite una ganancia de capacidad del orden de 12 a 15% con respecto a la clase B, mientras que el aumento del costo es del orden de 5 a 6%.

4.3.3 Comparación de los motores de corriente ondulatoria, con los motores de C.D.

Las pruebas efectuadas sobre máquinas modernas arrojan pequeñas diferencias de temperatura entre la operación en corriente ondulatoria y corriente directa.

Considerando el mismo régimen de prueba, estas diferencias son aproximadamente:

2 a 2.5% para la armadura.

5 a 6% para el devanado de campo.

2 a 3% para el conmutador.

La tensión nominal del motor de corriente ondulatoria, comparada con la tensión nominal de los motores de corriente directa, su valor será menor, debido precisamente a su naturaleza pulsatoria, por lo cual los materiales aislantes y la conmutación se verán solicitados de manera diferente.

En este caso no hay compromiso de elevar la tensión por considerantes de alimentación de la catenaria. No hay cambio de conexiones de serie a serie-paralelo. Existe una regla nombrada "cuadrado" o de "un ohm", que significa escoger aproximadamente $U \cong I \cong \sqrt{P}$, aplicable especialmente para motores de potencia menor de 1000 HP. A medida que la potencia aumenta más allá de este límite, la tensión se quedará atrás de la corriente debido a las limitaciones de material. (Es más factible aumentar la corriente, que la tensión).

Por razones de conmutación, con el fin de disminuir el flujo polar, el motor de corriente ondulatoria se construye con un número mayor de polos (preferentemente 6 y 8 polos).

Tanto los polos principales, como los de conmutación (auxiliares), se ejecutan de laminaciones.

Las pérdidas Joule, definidas como rI^2 , conforme a la relación 4.34 se puede decir que:

$$RI_{ef}^2 = RI_{prom}^2 \left(1 + \frac{\beta^2}{2}\right) \quad (4.47)$$

Considerando un factor rizo $\beta=30\%$, resulta un factor de multiplicación:

$$1 + \frac{0.3^2}{2} = 1.045 \quad (4.48)$$

Las pérdidas suplementarias en hierro, provocadas por la componente pulsatoria son producidas principalmente en el circuito magnético del estator. El grado en que estas pérdidas afectan el motor de corriente ondulatoria se refleja en el sobrecalentamiento y de manera implícita, en su eficiencia. En pruebas sucesivas en corriente

directa y corriente ondulatoria, con factor de rizo de 30%, resulta un aumento de temperatura de 5 a 6% para armadura, 8 a 10% para los polos principales, 6 a 7% para el colector, valores poco significativos en la utilización práctica.

La disminución de la eficiencia, para las condiciones antes enumeradas, es de 0.2 a 0.4%, que practicamente, es poco relevante.

El par motor.

Debido a que la corriente es ondulatoria, el par es pulsatorio con oscilaciones entre dos límites, $M + \Delta M$ y $M - \Delta M$ alrededor de un valor promedio (M_{prom}) en donde:

$$\Delta M \cong \frac{I_{prom}}{M_{prom}} \Delta I \quad y \quad (4.49)$$

$$\Delta I = \frac{I_{2fmax}}{I_{prom}} \quad (4.50)$$

En la figura 4.16 se aprecia la forma de oscilación del par motor, la cual es similar a la oscilación de la corriente, presentada en la figura 4.10.

Igualmente que la corriente, el par puede considerarse como compuesto de una componente constante (M_{prom}), una componente alterna senoidal, de doble frecuencia (100 o 120 Hz) y armónicas de orden superior.

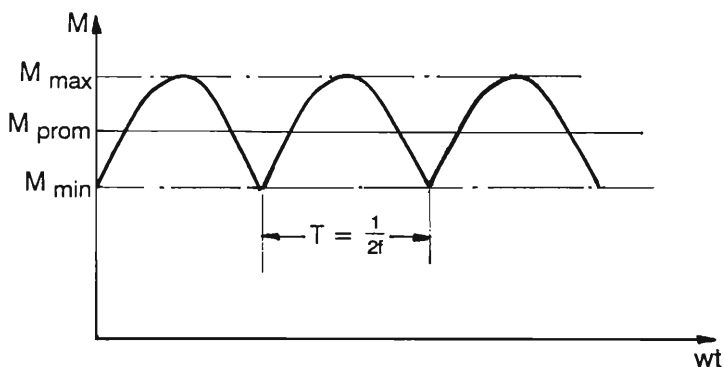


Fig. 4.16 Las pulsaciones del par, correspondientes a un motor de corriente ondulatoria.

4.3.4 Características del motor de corriente ondulatoria

Las características $V(I)$, $M(I)$, $\eta(I)$, y $F(V)$, del motor de corriente ondulatoria, son prácticamente las mismas que para el motor de corriente directa, en la inteligencia de tomar en consideración los valores promedios.

La posibilidad de regulación de velocidad a través de la tensión aplicada al motor de corriente ondulatoria, aunada a la ventaja de alimentación en alta tensión, coloca a este tipo de motor en un lugar más favorecido, con respecto al motor de corriente directa, en cuanto a su utilización en el transporte ferrocarrilero.

Aún a este tipo de motor se practica la disminución del campo, para conseguir un aumento en la fuerza de tracción a altas velocidades, después de haber llegado al límite de máxima tensión. Como consecuencia de esta última, resulta una economía en el diseño del transformador.

4.4 La regulación de velocidad

Las posibilidades de regulación de velocidad se expresa por la relación 3.61.

Contando con amplias posibilidades de variar la tensión aplicada U , ya no necesitamos de variar la resistencia R ; la disminución del flujo se aplica solamente después de haber llegado a la tensión máxima.

La mejor forma de variar la tensión aplicada a los motores, es cambiando la relación de transformación, del transformador de entrada (los taps) en su devanado de alta tensión, resultando:

$$U_2 = U_1 \frac{W_2}{W_1} \quad (4.51)$$

Donde:

W_1 = número de vueltas del devanado de alta tensión

W_2 = número de vueltas del devanado de baja tensión

Se varía la relación de transformación W_2/W_1 , de donde resulta que se puede realizar la regulación, sea en el lado de alta tensión, sea en el lado de baja tensión.

La solución de regulación de taps sobre el lado de alta tensión es mucho más generalizada, para las locomotoras eléctricas.

Un esquema de principio se ve en la figura 4.17a. En dicho esquema se aprecia que para elevar la tensión del secundario se requiere disminuir el número de vueltas sobre los cuales se aplica la tensión primaria, de conformidad con la relación.

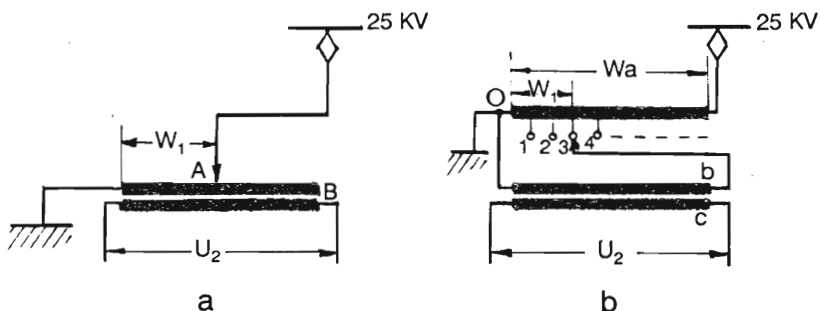


Fig. 4.17 Diagrama de regulación de voltaje sobre A.T.; a- Diagrama de principio; b - Diagrama práctico.

$$U_2 = K \frac{1}{W_1} \quad (4.52)$$

Para obtener una tensión U_2 nominal se llega a un punto A, más allá del cual no se puede disminuir W_1 .

El número de vueltas entre A y B, es muy grande, cosa que conduce a un transformador complejo.

En la práctica se utiliza un diagrama con tres devanados (ver fig. 4.17b), con un devanado de tipo auto transformador. La tensión aplicada al devanado "b" tiene el valor:

$$U_b = \frac{W_1}{W_a} U_{ob} = K W_1 \quad (4.53)$$

Como la relación entre los devanados "b" y "c" es constante, resulta que la tensión de salida U_2 es una función directa del número de vueltas W_1 .

Para obtener la tensión nominal U_2 , el captador de corriente debe estar colocado sobre el último tap del devanado de entrada, correspondiente al número de vueltas W_a .

En el segundo escalón, con K_1 abierto y K_2 cerrado, la tensión será

$$U_b = U + \Delta U \quad (4.54)$$

Si se realiza la conmutación abriendo K_1 y después cerrando K_2 no se cumple la primera condición.

Si se realiza al revés, es decir primeramente se cierra K_2 y después se abre K_1 , no se cumple la segunda condición.

Para cumplir ambas condiciones el esquema se complica: se necesita una resistencia de conmutación y cuando menos otro contactor.

Este diagrama se presenta en la figura 4.19. En la figura 4.19a se presenta la situación inicial, con K_1 cerrado, y la tensión siendo $U_b = U$.

En la figura 4.19d se presenta la situación final, con K_1 abierto y K_2, K_3 cerrados.

Los diagramas b y c representan posiciones intermedias de paso. En el diagrama b, K_1 y K_2 están cerrados, cortocircuitando las vueltas que producen ΔU , sobre la resistencia R. Esta resistencia

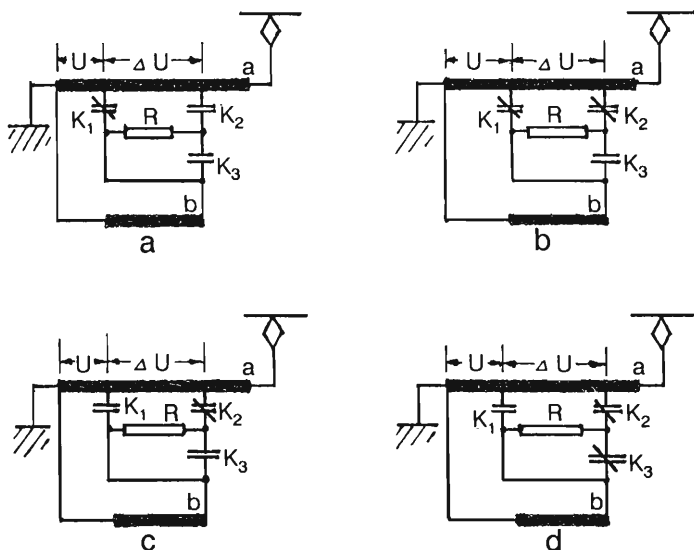


Fig. 4.19 Secuencias de operación para pasar de una tensión U a la siguiente posición; a - posición estable con U ; b y c - posiciones de paso; d - posición estable con $U + \Delta U$.

debe ser suficientemente grande para limitar la corriente en dichas vueltas a un valor aceptable.

En el diagrama c, K_1 se abre, la corriente principal circulando a través de la resistencia R. Esta resistencia debe soportar, en este momento, la corriente de carga. Por fin, en el diagrama d, se cierra el contactor K_3 , eliminando del circuito la resistencia R.

Para realizar una regulación fina de voltaje, e implícitamente de velocidad, sobre las locomotoras monofásicas se utiliza entre 30 y 40 pasos de regulación (taps). Utilizar el diagrama anteriormente descrito implica un número demasiado grande de contactores. Por esta razón se utiliza un aparato denominado “graduador”, el cual ejecuta la operación de conmutación de todos los taps. Se conocen varios tipos de graduadores, los más comunes son el tipo BBC y el tipo ASEA, correspondientes a las principales marcas de locomotoras eléctricas en el ámbito europeo.

4.4.1 Graduador tipo BBC

El graduador tipo BBC está confinado en un tanque con aceite, con contactores en el aire y tiene las siguientes características principales:

- Tensión nominal 25 KV
- Corriente nominal 400 A.
- Peso (con aceite) 400 Kg.
- Número de taps 32

El diagrama de principio de este graduador se presenta en la figura 4.20. Cada segmento del graduador se conecta a su tap correspondiente del transformador.

Las escobillas E_1 y E_2 conectan consecutivamente a los anillos a_1 , respectivamente a_2 , a los segmentos 1, 3, 5, respectivamente 2, 4, 6,

Los conectores K_1 , K_2 , y K_3 accionados mecánicamente cumplen exactamente las funciones de los contactores K_1 , K_2 y K_3 en el diagrama presentado anteriormente en la figura 4.19 y la resistencia R la misma función que la resistencia R del respectivo diagrama.

Los movimientos están sincronizados mecánicamente, de manera que el operador ejecuta una sola operación sencilla. El esfuerzo mecánico del operador al graduador es amplificado a través de un servomotor neumático. El movimiento de las escobillas es continuo.

4.4.2 Graduador tipo ASEA

El graduador de fabricación ASEA presenta algunas particularidades, con respecto al tipo BBC.

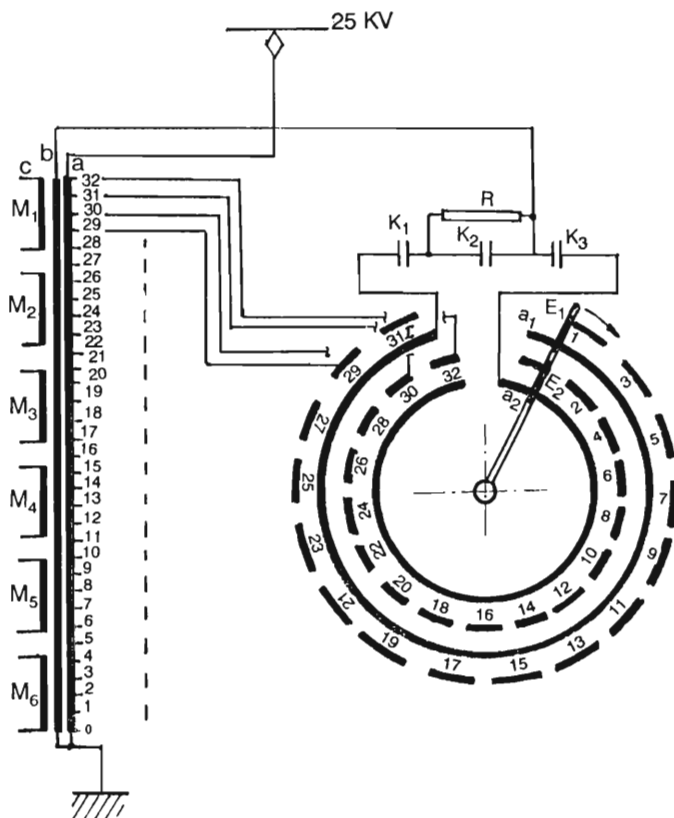


Fig. 4.20 El diagrama de principio del graduador tipo BBC.

- Tiene 4 contactores de trabajo.
- Cada tap del transformador conecta dos segmentos.
- Tiene un devanado suplementario (TS) en el transformador, el cual aplica un aumento de tensión $\Delta U/2$, cuando está conectado.
- Las escobillas E_1 y E_2 tienen movimientos alternados y sacudidos.

El diagrama de principio se presenta en la figura 4.21. Cuando la escobilla E_2 conecta al tap en turno n , la tensión aplicada a la carga será:

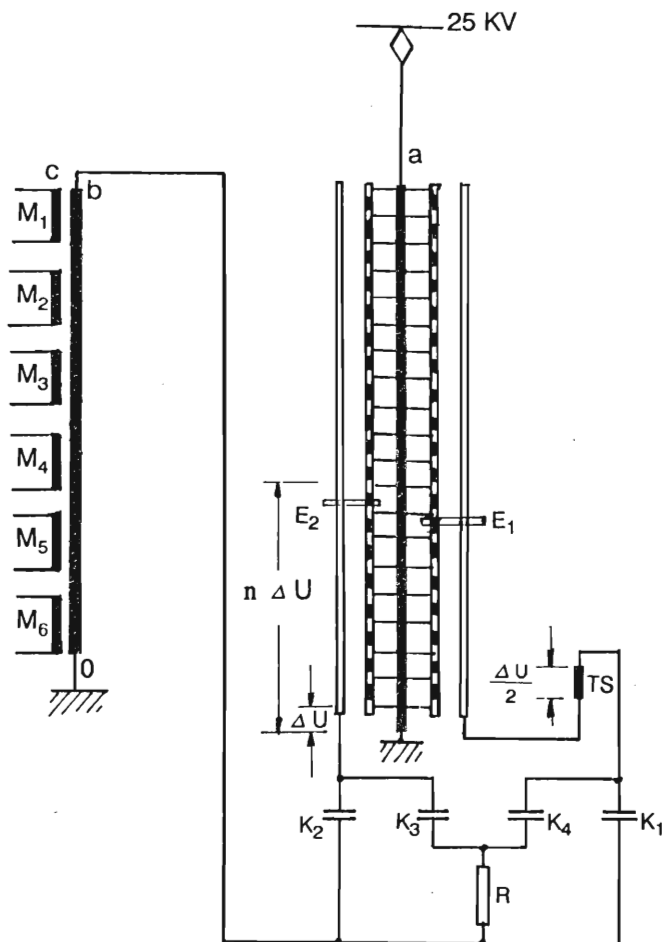


Fig. 4.21 El diagrama de principio del graduador tipo ASEA.

$$U_b = n\Delta U \quad (4.55)$$

Cuando la escobilla E_1 conecta el mismo tap, la tensión aplicada a la carga será:

$$Ub = n\Delta U + \frac{\Delta U}{2} \quad (4.56)$$

Este graduador presenta la ventaja que duplica el número de escalones de regulación para el mismo número de taps del transformador.

El accionamiento es eléctrico y presenta otra ventaja sobre los contactos en movimiento (más resistentes al uso), debido al movimiento sacudido.

4.5 El transformador

El transformador es el equipo mayor sobre una locomotora, tanto en dimensiones, como en peso e incluye la potencia total instalada sobre la locomotora (motores, servicios auxiliares y acondicionamiento del aire del tren).

Las funciones principales del transformador son: la reducción del voltaje de la catenaria (25KV) y la de regulación sobre alta tensión, de la tensión aplicada a los motores de tracción, a través de los rectificadores de silicio.

4.5.1 Construcción

Como se aprecia en la figura 4.1 el transformador dispone de varios devanados, lo que complica su construcción. Cada fabricante tiene sus particularidades en la construcción del transformador, pero en sí, se puede hablar de una metodología general, para este equipo.

En la figura 4.22 se presenta esquemáticamente los circuitos magnéticos y la disposición de los devanados de un transformador en particular. En este caso se podría hablar de tres transformadores monofásicos, colocados en el mismo tanque.

El devanado "a" sobre el núcleo TR es el devanado de alta tensión, conectado entre la catenaria y la toma de tierra. Este devanado está provisto con un número de taps de regulación (en este caso 20, de conformidad con la figura 4.1). El devanado "d" corresponde a los servicios auxiliares y al acondicionamiento de aire del tren.

El devanado "b" es el primario del segundo núcleo TT y el cual colecta la tensión de los taps de regulación. Este devanado está expuesto hasta la tensión de la catenaria (25KV).

El devanado "c" está seccionando en 6 partes idénticas, cada una correspondiendo a un motor de tracción, (ver fig. 4.1).

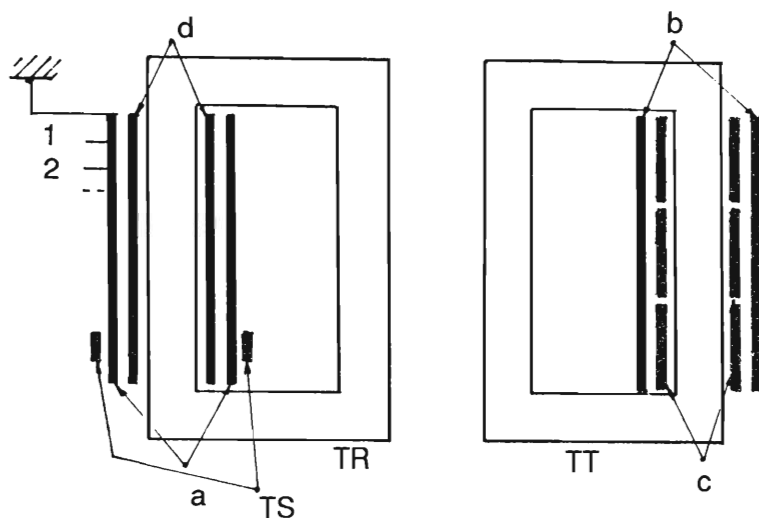


Fig. 4.22 Los núcleos y la disposición de los devanados de un transformador de locomotora.

Si la locomotora emplea freno reostático, se requiere de una fuente para excitación de las máquinas en régimen de generación, para lo cual se emplea un tercer transformador, con sus devanados de alta y baja tensión. (No aparece en la figura).

Debido a su tamaño, (dimensiones y peso), y para cubrir la potencia requerida, el transformador se diseña y se construye, utilizando límites superiores de densidad de corriente (4 a 4.5 A/mm², comparado con 2 a 2.5 A/mm², valores comunes en otros tipos de transformadores), en los devanados de cobre. Este régimen implica un enfriamiento con aceite forzado. El aceite se enfría en un intercambiador de calor aceite-aire, el aire teniendo una circulación forzada, para lo cual se emplea un ventilador.

4.5.2 Cálculo de derivaciones (taps)

Para determinar el número de las derivaciones de regulación, correspondiente al voltaje aplicado a los motores de tracción, se emplea un método grafoanalítico.

Escribimos la relación 3.62 en la siguiente forma:

$$V = \frac{U - rI_n}{U_n - rI_n} V_n \quad (4.57)$$

expresión que muestra la dependencia $V(U)$, la cual representa una recta.

En el primer cuadrante presentamos la curva $V(I)$ y en el segundo cuadrante la curva $V(U)$, (Ver fig. 4.23).

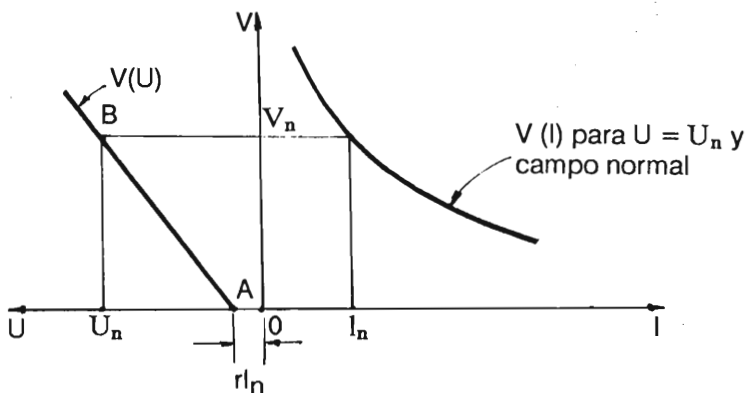


Fig. 4.23 Interdependencia entre las características $V(I)$ y $V(U)$ para el motor "serie".

Sobre la curva $V(I)$, buscamos el punto V_n correspondiente a I_n . Este punto corresponde al punto (B), U_n para la misma velocidad V_n , en el segundo cuadrante.

El segundo punto sobre la recta $V(U)$, corresponde a la velocidad cero.

$$U_o = rI_n \quad (4.58)$$

La regulación de voltaje para una corriente I_n fija, supone un número ilimitado de taps de regulación, cuya realización práctica es imposible.

Tenemos que admitir ligeras variaciones de corriente e implícitamente ligeras variaciones en la fuerza de tracción, entre dos límites, máximo y mínimo, entre dos derivaciones consecutivas de regulación de voltaje.

Se admiten estos límites en un rango de $\cong 10\% I_n$. En la figura 4.24 se repite lo mismo que en la figura 4.23, considerando dos rectas en el segundo cuadrante.

La primera recta queda definida por los puntos $A_1 (rI_1, 0)$ y $B_1 (U_n, V_1)$ correspondiendo a I_1 , el cual se toma aproximadamente igual a $0.9 I_n$.

La segunda recta queda definida por los puntos $A_2 (rI_2, 0)$ y $B_2 (U_n, V_2)$, V_2 correspondiendo a I_2 , el cual se toma aproximadamente igual a $1.1 I_n$.

U_n supone que todas las n derivaciones de tensión están incluidas. El cambio de una derivación a la siguiente significa el brinco del punto de operación de una recta a la otra sobre la curva $V(U)$ y de una corriente a la otra, sobre la curva $V(I)$.

El cambio de derivación se realiza instantáneamente, mientras que el cambio del punto de operación de V_2 a V_1 , sobre la familia de curvas $V(I)$ requiere de un tiempo para la aceleración del tren.

Al arranque desde cero, significa aplicar la tensión al primer tap, dimensionando de tal forma que en los motores circule la corriente I_2 . A medida que la velocidad aumenta, la corriente disminuye hasta llegar al valor I_1 . En este momento se pasa al segundo tap, desplazándonos sobre otra característica $V(I)$.

Cada cambio de derivación significa, en el primer cuadrante desplazarnos de una característica a otra, y en el segundo cuadrante la tensión aplicada cambia, lo que implica un desplazamiento sobre la horizontal, entre las dos rectas.

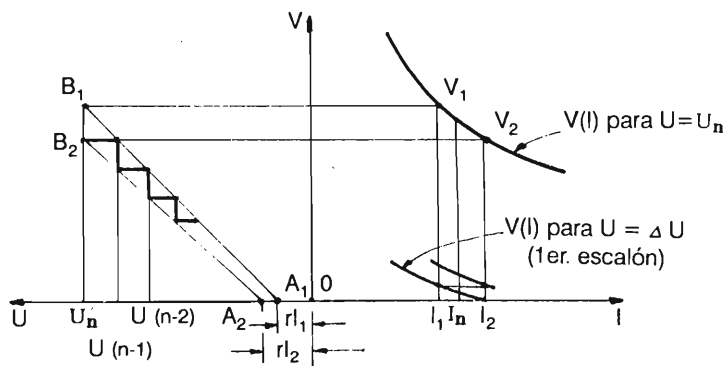


Fig. 4.24 Método gráfico para determinar los escalones de voltaje para el arranque y regulación del motor serie.

El proceso de aceleración, entre la corriente I_2 y la corriente I_1 significa, en el primer cuadrante desplazar el punto de operación sobre una misma característica y en el segundo cuadrante implica desplazar del punto de operación entre las dos rectas, a una tensión constante, es decir, sobre la vertical.

Así, sobre una construcción gráfico analítica, se deduce el número de derivaciones, para que la corriente no salga de los rangos establecidos. Para facilidad constructiva, se admite un ΔU constante entre todas las derivaciones.

4.5.3 Potencia de los devanados

La potencia de cada devanado del transformador depende del modo de regulación del voltaje.

Se define como potencia de diseño de un devanado el producto de la tensión máxima en vacío por la intensidad de corriente que circula por el devanado en régimen continuo. Este es un valor convencional resultado de la asociación de dos magnitudes eléctricas, aunque no corresponden simultáneamente a un mismo régimen funcional, pero que arroja una imagen de diseño.

Escribimos la relación 4.23 en la forma:

$$U_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 - (\Delta U_{rec} + \Delta U_{BA}) \quad (4.59)$$

Las caídas de voltaje sobre el rectificador y sobre la inductancia representa aproximadamente un 17% de U_2 resultando:

$$U_m = 0.9U_2 / (1 - 0.17) \cong 0.75U_2 \quad (4.60)$$

De donde resulta que:

$$U_2 = 1.34U_m \quad (4.61)$$

De la relación 4.34, para un factor de ondulación $\beta=0.3$, la corriente será:

$$I_2 = (1 + \frac{\beta^2}{4}) I_m = 1.02 I_m \quad (4.62)$$

La potencia del secundario del transformador (c/u de los devanados “c”) será:

$$P_2 = U_2 I_2 = 1.34U_m \cdot 1.02I_m = 1.37U_m I_m \quad (4.63)$$

Para los seis motores

$$P_{2tot} = 8.2U_m I_m \quad (4.64)$$

El devanado “b” tendría:

$$P_1 = P_2 = 8.2 U_m I_m \quad (4.65)$$

El devanado “a” (ver fig. 4.22) tiene una corriente variable dependiendo del tap que está conectado. Se estima esta corriente a un 75% del valor de I_1 , del devanado “b”.

Las necesidades de potencia para acondicionamiento del aire del tren y de los otros servicios auxiliares se estiman, también P_{AC} y P_{SA} , las cuales sirven para el diseño del devanado “d” y con estas resulta la potencia para el devanado “a”:

$$P_{dev.a} = 0.75 \times 8.2U_m I_m + P_{AC} + P_{SA} \quad (4.66)$$

Algunos constructores particularizan la capacidad de sobrecarga del transformador, dependiendo del perfil de la vía: Una vía con perfil irregular, donde las sobrecargas alternan con reposo, permiten un coeficiente de sobrecarga mayor que una línea más uniforme, donde las máquinas trabajan más tiempo a la misma carga.

4.6 Los servicios auxiliares

Se entiende por servicios auxiliares equipos e instalaciones no referentes a la fuerza tractiva y a la regulación de velocidad de manera directa, pero sin ellos la locomotora no puede operar.

Para las locomotoras con rectificadores en la figura 4.25 se presenta un diagrama de bloques, en el cual se muestran los servicios auxiliares.

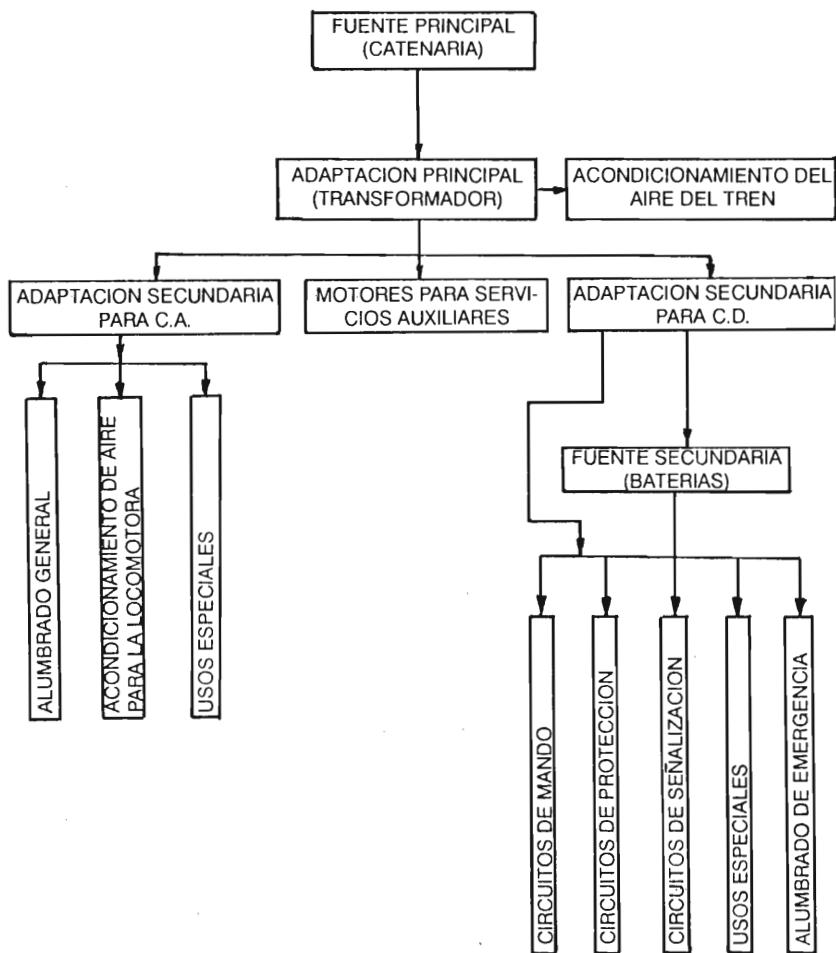


Fig. 4.25 Alimentaciones para los servicios auxiliares.

Examinando este diagrama, los servicios auxiliares se pueden agrupar en tres partes:

- La fuente de alimentación con la instalación de adaptación principal.

El primer bloque está representado por la catenaria y el segundo por el mismo transformador.

- Los alimentadores a los motores que mueven los distintos equipos, componentes de los servicios auxiliares, como son: compresores, ventiladores, bombas.

- Los alimentadores para los circuitos de mando, protección y señalización.

Sobre la locomotora disponemos de energía eléctrica, pero disponemos de una sola fase, sacando del transformador la tensión que deseamos.

La mejor solución para accionar los equipos de los servicios auxiliares, será con motores trifásicos tipo jaula de ardilla. Pero no disponemos de un sistema trifásico.

Para resolver este problema, se utiliza una de las siguientes soluciones.

4.6.1 Motores monofásicos 50/60 Hz

Son conocidos este tipo de motores de una sola fase, utilizando alguna manera de arranque (fase dividida, capacitor, etc).

Comunmente se utilizan mucho este tipo de motores, pero solamente para potencias pequeñas (como motores fraccionarios). Para potencias mayores no representan una solución, debido a su baja eficiencia, gran consumo de materiales y aumento de peso.

4.6.2 Convertidor monofásico tipo ARNO

Para obtener un sistema de alimentación trifásica sobre la locomotora se idearon varios esquemas y procedimientos. El convertidor ARNO es uno de estos procedimientos y consta de un motor de inducción tipo jaula de ardilla, alimentando desde el transformador en forma monofásica.

La distribución del devanado estatorico es trifásica (ver fig. 4.26), pero modificada y conectada como se aprecia en el esquema.

Para el arranque de este convertidor se requiere de un procedimiento auxiliar (por ejemplo la tercera fase, como fase dividida).

Las terminales C_1 , C_2 y C_3 pueden entregar energía en forma trifásica a motores trifásicos tipo jaula de ardilla. Entre las terminales C_2 y C_3 se recomienda conectar un capacitor.

También, es recomendable que al conectar cada motor se conecte un capacitor, para evitar el sobrediseño del convertidor. (El mejoramiento local del factor de potencia).

Los motores de los servicios auxiliares se conectan sobre las barras del convertidor y a la flecha del mismo se acopla un pequeño generador de C.D. que se utiliza como cargador de baterías.

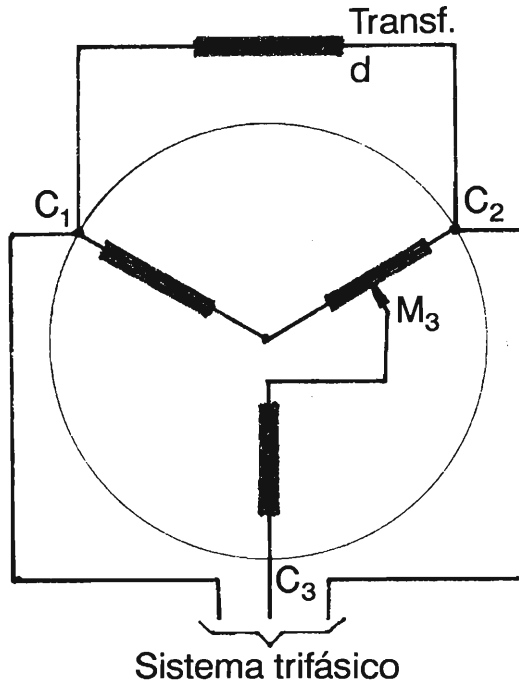


Fig. 4.26 El principio del convertidor ARNO.

El principal problema en contra de esta solución, es la variación de la tensión, de la línea de contacto (desde 27 KV, hasta 19 KV, ver tabla 3.2), cosa que se manifiesta en la variación del par (proporcional con U^2) y de la corriente (inversamente proporcional con el voltaje), finalmente influyendo sobre la temperatura e indirectamente conduce a un sobre diseño de los motores.

4.6.3 Convertidor monofásico tipo motor síncrono

Un motor monofásico síncrono está moviendo un generador trifásico de una frecuencia más elevada (125 o 150 Hz). Esta frecuencia permite realizar motores trifásicos más livianos.

Aunque presenta algunas ventajas, esta solución no estuvo generalizada sobre las locomotoras eléctricas.

4.6.4 Convertidor monotrifásico estático

Si del devanado de baja tensión del transformador (devanado “d”), sacamos tres taps de tensión, obtenemos un sistema trifásico, pero los tres fasores están en el mismo ángulo de fase (ver fig. 4.27b). Introduciendo un capacitor en el punto B, los fasores OA, AC y CO forman un sistema trifásico desequilibrado. (Ver fig. 4.27c).

Buscando adecuadamente (utilizando métodos analíticos), los valores de los taps y de la capacitancia, este sistema se puede equilibrar.

Se precisa que este sistema quede simétrico solamente para la carga, la tensión y la capacitancia, para los cuales estuvo diseñado. Cualquier cambio vuelve el sistema al estado asimétrico, situación que repercute sobre los motores que se alimentan. Por supuesto que se admite un determinado nivel de asimetría.

Cambiando los taps de salida de A(A_1, A_2) y B(B_1, B_2) se puede compensar las variaciones de voltaje excesivas, de la catenaria. Este cambio se realiza sin desconectar la carga, cortocircuitando las vueltas intertaps sobre una resistencia. Este cambio de taps se puede realiza automáticamente a través de un relevador de tensión.

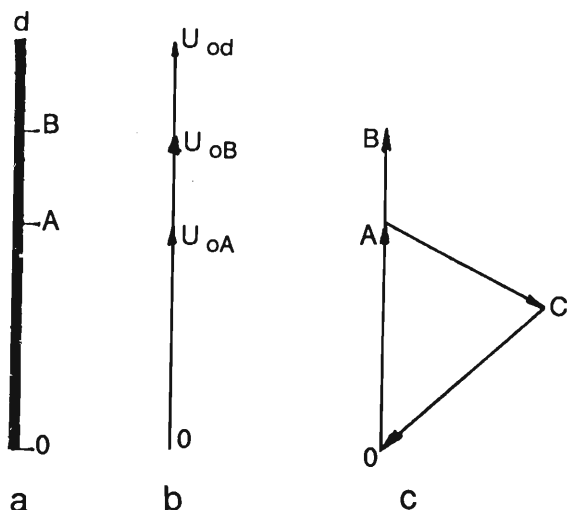


Fig. 4.27 Diagrama de principio del convertidor monotrifásico estático. a.- Devanado “d” con sus taps; b.- Fasores en el mismo ángulo; c.- Fasores obtenidos con un condensador.

Los motores de los servicios auxiliares se dividen por grupos de operación. Cada grupo que se conecta a la red, implica la conexión simultánea de una capacitancia debidamente diseñada para la respectiva carga.

Debido a que la corriente de arranque para un motor jaula de ardilla es hasta siete veces la corriente nominal, cada vez que se conecta un grupo de carga, se conecta, solamente para el arranque, un banco de capacitores adicionales, que se desconectan cuando el arranque se considera terminado. Estos capacitores sirven para arrancar todas las cargas, por grupos.

Existen interbloques que no permiten el arranque de dos grupos de carga a la vez.

Debido a la asimetría que ocurre en el diagrama, aún con los mejoramientos enumerados, el régimen de operación de los motores trifásicos tipo jaula de ardilla es bastante pesado. Para mejorar la confiabilidad en operación de estos motores se toman las siguientes medidas:

- Introducir en el circuito de cada grupo de motores una bobina, para aumentar la inductancia, así formando un filtro junto con las capacitancias, con fines de reducir las armónicas de orden superior, causantes de los principales problemas a los motores.
- Introducir un apartarrayos para proteger contra sobretensiones de conmutación entre las fases.
- Sobredimensionar los motores, para aguantar este régimen pesado.

4.6.5 Convertidor monotrifásico tipo estado sólido

Este método supone el método anteriormente descrito, pero provisto de un sistema estabilizador, controlado por circuitos electrónicos. Es una solución novedosa aún en estado de investigación.

4.6.6 Motores de corriente ondulatoria

Este método supone la utilización de motores de corriente directa, de tipo ondulatorio, también para servicios, como se utiliza para la tracción.

El devanado "d" del transformador está acoplado con un rectificador, el cual suministra la corriente directa para todos los motores de los servicios auxiliares.

De los métodos enumerados, más usuales son el uso del convertidor ARNO y el convertidor estático.

Los motores de corriente ondulatoria se usan en la Unión Soviética.

4.7 El freno reostático

La teoría general y los principios del freno reostático son los mismos que para la locomotora de corriente directa, descrita en el párrafo 3.8.

Se recuerda que:

- El motor serie pasa a trabajar en régimen generador con excitación independiente.

- Las máquinas de tracción, en régimen de generador, cierra su circuito sobre una resistencia de valor fijo, cada máquina con su propia resistencia.

- Las excitaciones separadas de los generadores se conectan en serie, requiriendo de una alimentación única.

Para la alimentación se dispone de uno de los siguientes métodos:

- Un rectificador separado, acoplado a un devanado particular del transformador.

- El rectificador de uno de los motores, teniendo la posibilidad de regular el voltaje a través del propio graduador, controlando así la excitación.

- Utilizando un circuito separado, a base de tiristores, para controlar la excitación a través del ángulo de encendido.

En la figura 4.28 se presenta un diagrama esquemático del circuito eléctrico principal del freno reostático, para una locomotora de 6 motores, utilizando el circuito del transformador rectificador, perteneciente al motor número 3, para la alimentación de las excitaciones enseriadas.

La realización del circuito implica la utilización de varios contactores para separar los circuitos de las máquinas en operación de motor y reconectarlas en operación como generador, como se indica en el respectivo diagrama. Además se requiere controlar la corriente en las máquinas (basta controlar en una sola), para no rebasar el límite de carga de las mismas.

Para el estudio de las características del freno, en el régimen estacionario, se recuerda la relación:

$$E = K\phi V = (r + R_f)I \quad (4.67)$$

de donde resultan:

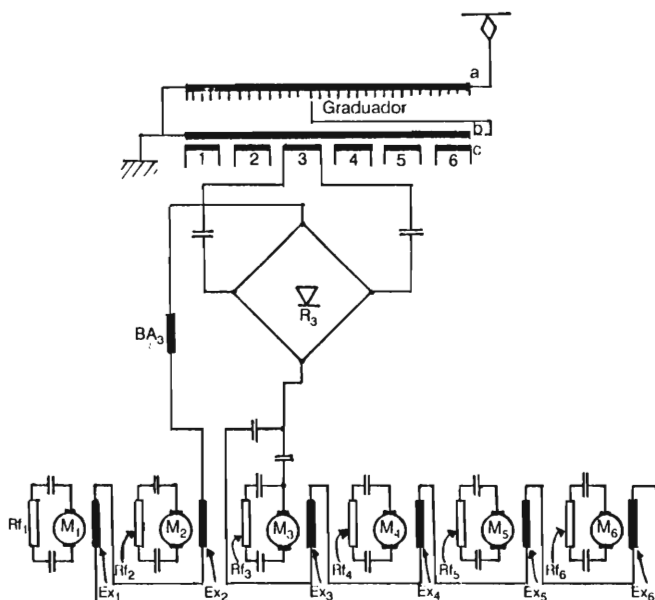


Fig. 4.28 El diagrama eléctrico del freno reostático, utilizando el circuito de fuerza de un motor para la excitación.

$$I = \frac{K\phi V}{r + R_f} \quad (4.68)$$

6

$$\phi = \frac{(r + R_f)I}{KV} \quad (4.69)$$

El par se controla conforme a la relación 3.36, considerando la situación de freno:

$$M_f = K'\phi I \quad (4.70)$$

Despejando una sola variable, de las relaciones anteriores, resulta:

$$M_f = \frac{K' K}{r + R_f} \phi^2 V \quad (4.71)$$

6

$$M_f = \frac{K'}{K} (r + R_f) \frac{I^2}{V} \quad (4.72)$$

De estas dos relaciones resulta la característica $M_f(V)$, respectivamente la fuerza de freno en función de la velocidad $F_f(V)$, para cada uno de los casos, $\phi = \text{constante}$ ó $I = \text{constante}$.

En la figura 4.29 se presentan estas características.

La característica $F_f(V)$ para ϕ constante es una recta, su inclinación dependiendo del valor de la corriente de excitación $\phi(I_e)$.

La característica $F_f(V)$ para una corriente de armadura constante tiene una forma hiperbólica.

Las limitaciones de la fuerza de freno están marcadas con líneas sombreadas, siendo estas la corriente de excitación máxima, la corriente de armadura máxima y la velocidad máxima admitida por la locomotora o por el recorrido.

Los puntos A y B indican la fuerza de freno máxima, para una velocidad específica V_A y una fuerza de freno específica $F_f(B)$ que puede proporcionar la locomotora a su velocidad máxima.

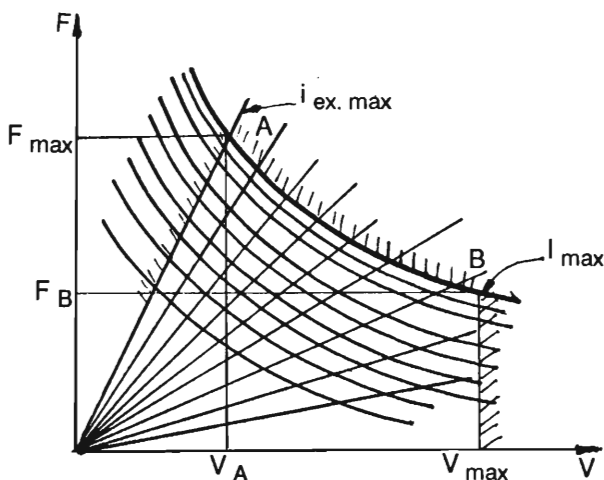


Fig. 4.29 Características de freno reostático para una locomotora tipo monocontinua.

5. Locomotoras eléctricas con tiristores

Este tipo de locomotoras constituye un grupo más desarrollado que las descritas en el capítulo 4, anterior, y por consiguiente se emplean en un sistema de electrificación monofásica a la frecuencia industrial y alta tensión (50/60 Hz, 25 ó 50 KV).

5.1 Circuito principal de fuerza

Podemos considerar que el circuito principal de fuerza, sobre una locomotora con tiristores es bastante similar al de una locomotora monocontinua, como se muestra en la figura 4.1. Las diferencias se notan en la rectificación (RI) y en el sistema de regulación de velocidad (voltaje).

En este caso desaparece el graduador. Su función la cumple un equipo electrónico menos voluminoso, menos pesado, pero conteniendo componentes electrónicos complejos.

5.2 La rectificación con tiristores

En el párrafo 4.2 se describen someramente las características del silicio como semiconductor, así como el diodo a base de silicio. De manera semejante, el tiristor basa su operación en las propiedades de la pastilla semiconductor.

Si consideramos enseriadas (pegadas) dos pastillas rectificadoras, cada una teniendo características de impurezas distintas, lo cual

implica características distintas de barreras de potencial, se llega a un elemento de tres uniones de barreras de potencial (ver fig. 5.1). Este elemento se coloca en un circuito de corriente alterna y se le aplica voltaje alternativamente en uno y otro sentido. Al aplicar el voltaje en el sentido (-) A y (+) K la corriente no puede circular por la razón de que encuentra dos barreras de potencial adverso (semejantes a las presentadas en la figura 4.2) en S_1 y S_3 . Esto equivale a que de las tres pastillas formadas, S_1 y S_3 se comporta como diodos en sentido inverso y S_2 como un diodo en sentido de conducción.

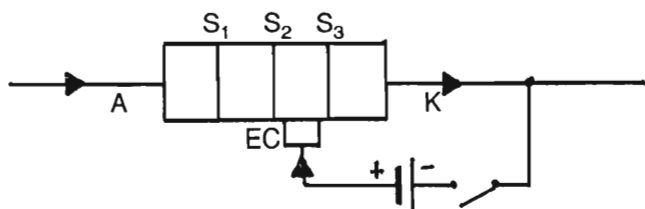


Fig. 5.1 Tiristor elemental en un circuito de corriente alterna.

Cuando se aplica el voltaje en el sentido (+) K y (-) A, se invierten las cosas, siendo S_1 y S_3 en sentido de conducción y S_2 en sentido inverso.

La primera situación cuando las uniones S_1 y S_3 están bloqueadas corresponden al tiristor en estado de bloqueo en sentido inverso.

La segunda situación, cuando la unión S_2 está bloqueada, corresponde al tiristor en estado de bloqueo en sentido directo.

Estos estados de bloqueo se pueden apreciar sobre la gráfica en la figura 5.2. Ahora bien, si el tiristor está bloqueado en sentido directo y por algún medio se le inyecta una determinada corriente, se destruye la barrera de potencial S_2 y la corriente circula libremente, como en un diodo.

Esta corriente se inyecta a través de un electrodo especial (ver EC en la figura 5.1) sobre una de las pastillas intermedias del tiristor.

Dependiendo de la magnitud de esta corriente, nombrada corriente de desbloqueo, el tiristor pasa en estado de conducción a un determinado voltaje aplicado.

Como la resistencia del circuito a través del cual circula esta corriente, tiene un valor determinado, resulta que el encendido (desbloqueo) del tiristor depende del voltaje aplicado.

Hay que mencionar que el tiristor una vez encendido (en conducción), su estado ya no depende de la corriente de desbloqueo.

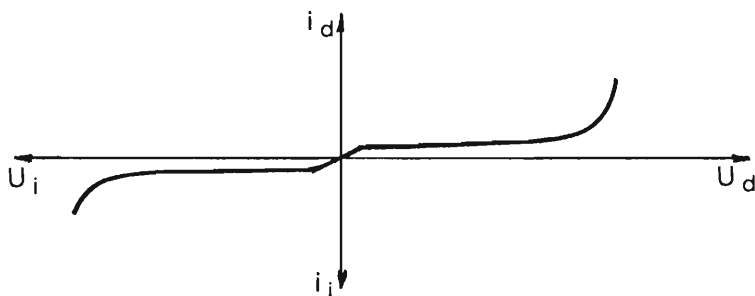


Fig. 5.2 Características del tiristor en estado bloqueado.

En la figura 5.3 se muestra gráficamente la forma típica de la característica de desbloqueo de un tiristor.

Se puede concluir que el punto de encendido de un tiristor puede ser controlado en función del voltaje de impulso, que crea la corriente de encendido.

De los vistos hasta aquí, resulta que un tiristor conectado en un circuito de corriente alterna permite la circulación de la corriente solamente después de haberse desbloqueado con un impulso de voltaje sobre el electrodo de control.

Como este impulso está controlado en función del aumento de la senoide y como ésta es una función de tiempo, resulta un ángulo de encendido (un retraso del desbloqueo con respecto a la onda senoidal aplicada en el sentido de conducción). (Ver fig. 5.4).

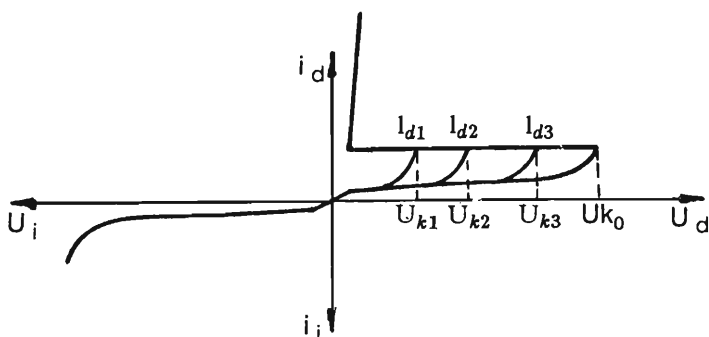


Fig. 5.3 Característica de bloqueo de un tiristor.

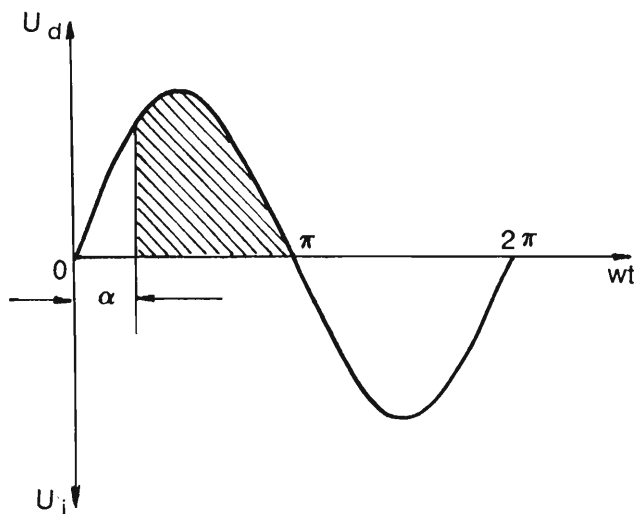


Fig. 5.4 Ángulo de encendido y tiempo de conducción de un tiristor.

5.3 Diagramas de conexión de los tiristores

Los tiristores, como en el caso de los diodos, se pueden conectar en puente y en conexión “push-pull” (ver fig. 4.8). Por las mismas razones vistas en el capítulo 4, se prefiere la conexión en puente de los tiristores, en uso sobre las locomotoras eléctricas.

Pero en el caso de los tiristores, los puentes pueden ser de dos tipos: puente completamente tiristorizado y puente híbrido.

En el primer caso, sobre cada ramal del puente se coloca un tiristor (o grupo de tiristores) y en el segundo caso, sobre cada ramal de conducción (1, 4 o 2, 3, en la figura 5.5a), se conecta sucesivamente un tiristor y un diodo.

5.3.1 Puente completamente tiristorizado

El diagrama de montaje es idéntico que en la figura 4.8b, excepto que en vez de diodos se colocan tiristores.

En la figura 5.5a repetimos este diagrama considerando los respectivos tiristores. Si consideramos que la bobina de alisamiento BA tiene un valor ilimitado, la corriente en el circuito del motor

será continua (fig. 5.5e). La tensión en el secundario del transformador es senoidal (fig. 5.5b).

Precisamos que el puente tiristorizado conduce la corriente sobre un ramo (1, 4 o 2, 3, en la figura 5.5a) hasta que el otro ramo recibe el impulso de desbloqueo.

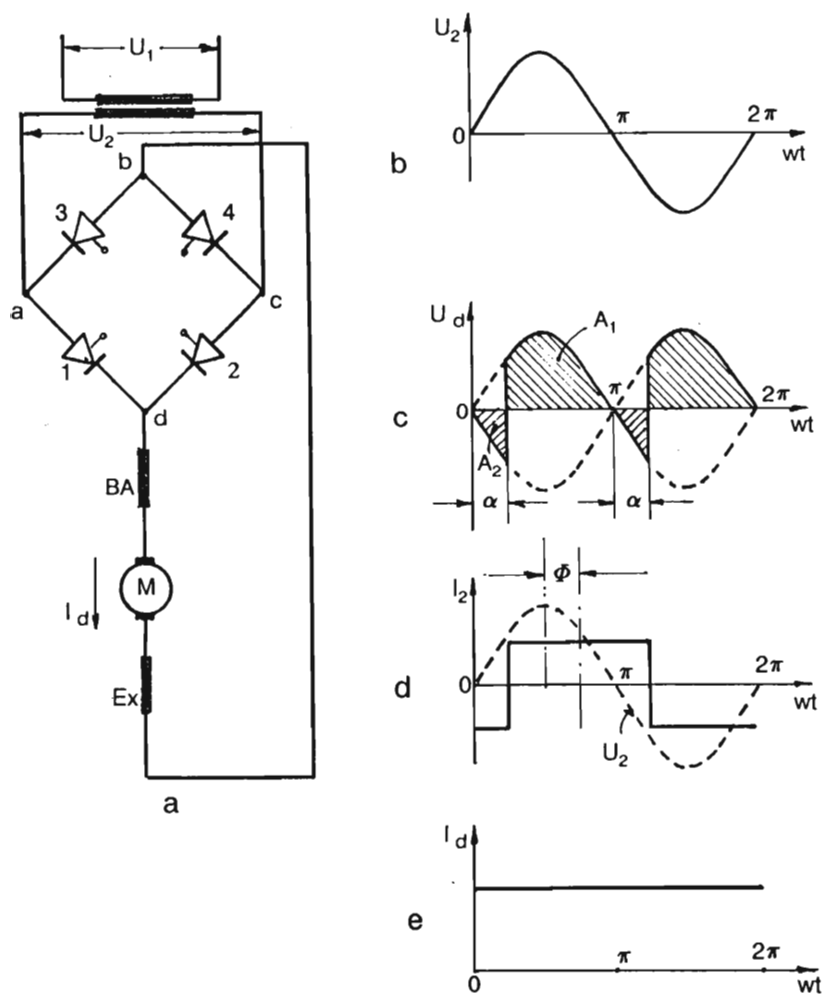


Fig. 5.5 Puente completamente tiristorizado. a.- Diagrama de montaje; b.- Voltaje U_2 ; c.- Voltaje U_d ; d.- corriente I_2 ; e.- corriente I_d .

Si por el momento, no consideramos el ángulo de conmutación (ver párrafo 4.2.5), la tensión rectificadora tendrá la forma como se presenta en la figura 5.5c y la corriente en el secundario del transformador, como se presenta en la figura 5.5d.

Se aprecia que la tensión rectificadora (ver figura 5.5c), se reduce de dos maneras; primero es reduciendo la cantidad rectificadora, anotada con A_1 sobre la gráfica y segundo es aplicando el voltaje en sentido inverso, o sea disminuyendo con esta cantidad notada con A_2 sobre la misma gráfica.

Con estas anotaciones se puede decir que la tensión promedio rectificadora es:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} U_2 \operatorname{sen} wt d(wt) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha \quad (5.1)$$

Se deduce fácilmente (y se comprueba sobre la gráfica), que si $\alpha=90^\circ$ la tensión rectificadora se reduce a cero. Si $\alpha > 90^\circ$ el voltaje cambia de signo, que nos hace suponer que la máquina pasa en régimen generador.

Si tomamos en consideración también el ángulo de conmutación (ver párrafo 4.2.5, y la relación 4.22), se complementa la relación anterior, quedando esta de la siguiente manera:

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha - \frac{2X_1}{\pi m^2} I_m \quad (5.2)$$

recordando que:

X_1 = reactancia del transformador, en ohms, vista desde el primario.

m = relación del transformador.

I_m = corriente en el motor.

El segundo término representa la caída de voltaje, debido al fenómeno de conmutación.

Analizando de nuevo la figura 5.5c, vemos que la diferencia entre las superficies A_1 y A_2 depende del ángulo α .

El ángulo α se puede regular a voluntad. Se entiende que si $\alpha = \frac{\pi}{2}$ entonces $U_d = 0$ y si $\alpha = 0$ entonces U_d = máxima, y la relación (5.2) queda idéntica que la relación 4.22.

Si $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$, (la superficie $A_2 > A_1$ en la gráfica 5.5c) el voltaje en C.D. cambia de signo. El puente pasa a trabajar en régimen de inversor.

En la figura 5.5d, además de la corriente en el secundario del transformador, se presenta de nuevo (pausando) el voltaje U (mismo que 5.5b). Se aprecia el desfaseamiento entre el voltaje y la corriente. Es fácil entender que mientras menor sea el ángulo de encendido, mayor será el factor de potencia para el sistema, considerando el transformador como un consumidor.

5.3.2 Puente híbrido

El puente híbrido está formado con un tiristor y un diodo sobre cada ramal de conducción, o sea (1) tiristor (4) diodo en el sentido adMbc (ver figura 5.5a) y (2) diodo, (3) tiristor en el sentido cdMba.

Queda claro que cada ramal conducirá cada semiperiodo, en el sentido de conducción, después del ángulo α , cuando el respectivo tiristor estuvo desbloqueado (ver figura 5.6). En este caso ya no se aplica la conducción en el sentido inverso (desaparece el área A_2 en la figura 5.5c).

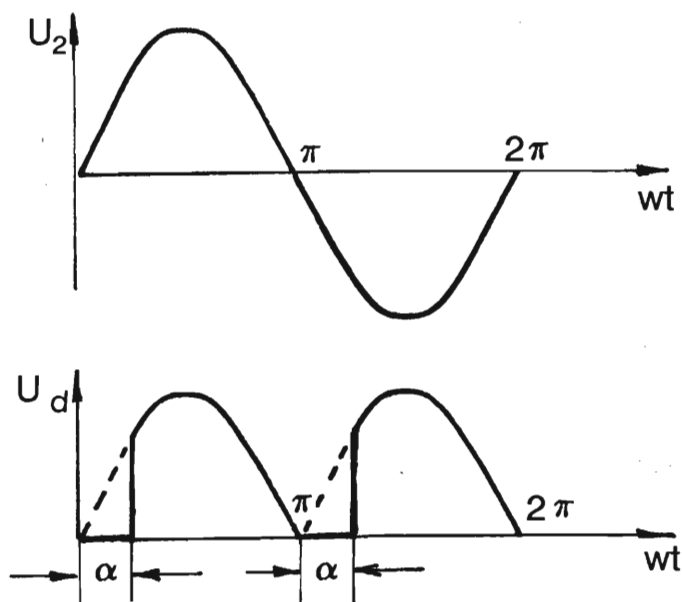


Fig. 5.6 Rectificación del voltaje con el puente híbrido.

Debido a que el circuito de C.D se cierra a través del puente, eliminando de este circuito el devanado secundario del transformador y considerando una conmutación instantánea, la expresión de la tensión promedio rectificadora será:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \operatorname{sen} wt d(wt) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (1 + \cos \alpha) \quad (5.3)$$

Para el ángulo de encendido $\alpha < \gamma$ se podría hacer la corrección como en el párrafo 4.2.5, pero para un ángulo de encendido $\alpha \geq \gamma$ ya no se aplica este concepto debido a que ya no se habla de un puente cortocircuitado.

Los valores extremos serán:

$$\alpha = 0; \cos \alpha = 1; U_{dmax} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 - \frac{2X_1 I_2}{\pi m^2} \quad (5.4)$$

(Misma relación que 4.22).

$$\alpha = \pi; \cos \alpha = -1; U_{dmin} = 0 \quad (5.5)$$

El dominio de regulación de voltaje para un puente híbrido comprende:

$$0 < \alpha < \pi \quad (5.6)$$

Lo que significa una gran fineza en la regulación de velocidad.

5.4 El factor de potencia para una locomotora con tiristores

En los párrafos antecedentes se mencionó el factor de potencia de un puente tiristorizado.

Es interesante notar que para un mismo ángulo de encendido, el factor de potencia es mayor para el puente híbrido que para el puente completamente tiristorizado.

Esto se puede entender mejor sobre las gráficas de la figura 5.7. Se aprecia que una vez encendido el puente tiristorizado, correspondiente al ángulo α , conduce hasta un ángulo $\pi + \alpha$, mientras que el puente híbrido conduce solamente desde α hasta π .

Recordando que el puente tiristorizado rectifica solamente para un α comprendido entre cero y $\pi/2$, y que el puente híbrido rectifica para un α comprendido entre 0 y π , de todos modos, el problema del factor de potencia es bastante delicado.

En el caso del puente híbrido tenemos:

- Corriente en el secundario del transformador,

$$I_2 = \sqrt{\frac{I_d^2(\pi - \alpha)}{\pi}} = I_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (5.7)$$

- Potencia aparente en el secundario:

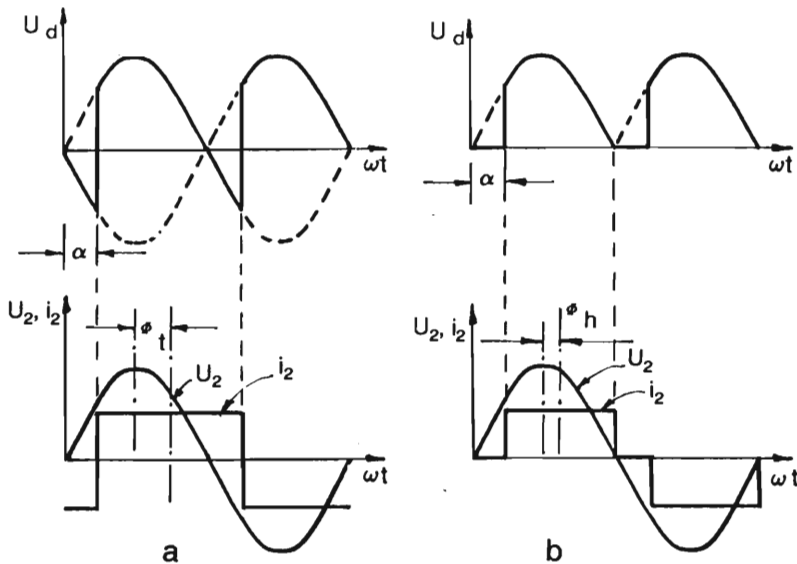


Fig. 5.7 Desfasamiento entre voltaje y corriente en el secundario del transformador; a.- Puente completamente tiristorizado; b.- Puente híbrido.

$$P_2 = U_2 I_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} U_d \cdot I_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} \cdot \frac{1}{1 + \cos \alpha} \quad (5.8)$$

- Potencia activa:

$$P_d = U_d \cdot I_d.$$

De donde resulta:

$$\cos \phi_h = \frac{U_d I_d}{U_2 \cdot I_2} = \frac{\sqrt{2}(1 + \cos \alpha)}{\sqrt{\pi} \cdot (\pi - \alpha)} \quad (5.9)$$

En el caso del puente completamente tiristorizado tenemos:

- Potencia aparente:

$$P_2 = U_2 \cdot I_d \quad (5.10)$$

Potencia útil:

$$P_d = U_d \cdot I_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha \cdot I_d \quad (5.11)$$

(No se consideró la caída del voltaje debido al efecto de conmutación).

Resultando

$$\cos \phi_t = \frac{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha \cdot I_d}{U_2 \cdot I_d} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha \quad (5.12)$$

Haciendo la relación:

$$\frac{\cos \phi_h}{\cos \phi_t} = \frac{\frac{\sqrt{2}(1 + \cos \alpha)}{\sqrt{\pi} \cdot (\pi - \alpha)}}{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha} = \frac{\pi}{\sqrt{\pi} \cdot (\pi - \alpha)} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2 \cos \alpha} \quad (5.13)$$

De donde se deduce que:

$$\cos \phi_h > \cos \phi_t \quad (5.14)$$

para un mismo α .

Se afirmó anteriormente que el ángulo de encendido α puede variar entre cero y π , en el caso del puente híbrido.

Esto significa que el voltaje aplicado a los motores puede variar desde el valor nominal hasta cero. Pero se vió que para valores de α entre $\pi/2$ y π el factor de potencia empeora mucho.

Para mejorar esta situación se emplea la conexión serie de los puentes híbridos en dos, tres o máximo cuatro niveles.

Un diagrama de montaje con dos puentes conectados en serie (dos niveles) se muestra en la figura 5.8a.

La operación de este puente se resume en los siguientes: Consideramos el contactor K_1 cerrado y K_2 abierto. Al puente rectificador PR_1 se le aplica el voltaje U_2 . Este puente puede aplicar al motor, desde el voltaje $U_d=0$ ($\alpha_1 = \pi$) hasta $U_d=U_m/2$ ($\alpha_1=0$).

Con $\alpha_2 = \pi$ se cierra el contactor K_2 . Disminuyendo el ángulo de encendido α_2 desde π ($U_d=U_m/2$ por $U_{2,1}$ completo con $\alpha_1=0$), hasta cero, cuando todo el voltaje $U_{2,2}$ se aplica al motor, situación límite en la cual $U_d=U_m$.

Esto se puede apreciar sobre la gráfica de la figura 5.8b.

Considerando n puentes enseriados ($n = 2, 3$ o 4) y admitiendo que el voltaje al motor (o motores) se regula desde cero al valor U_m , a través de puentes híbridos enseriados, se entiende que la operación se desarrolla similar a la descrita anteriormente, o sea; para el PR_1 se varía el ángulo de encendido desde $\alpha_1 = \pi$ hasta $\alpha_1=0$, para la cual la tensión $U_d = U_m/n$, después siguiendo PR_2 con su ángulo $\alpha_2 = \pi$ ($U_d = U_m/n$), hasta $\alpha_2 = 0$ ($U_m = 2U_m/n$) y así hasta que $\alpha_n = 0$ ($U_m = nU_m/n = U_m$, o sea, la tensión nominal del motor).

Queda claro que el ángulo de encendido α y los siguientes, se mantiene cero cuando se aplica la variación a los subsecuentes ángulos de encendido.

Con estas aclaraciones hechas, podemos principiar a calcular el factor de potencia, para varios puentes híbridos enseriados.

Para el primer puente tenemos:

$$P_{d1} = U_{d1} \cdot I_d = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cdot I_d (1 + \cos \alpha_1) \quad (5.15)$$

En el caso límite

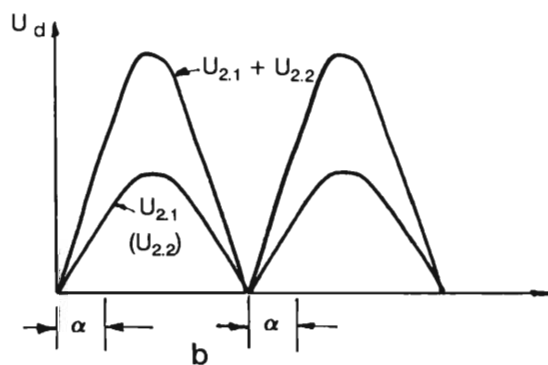
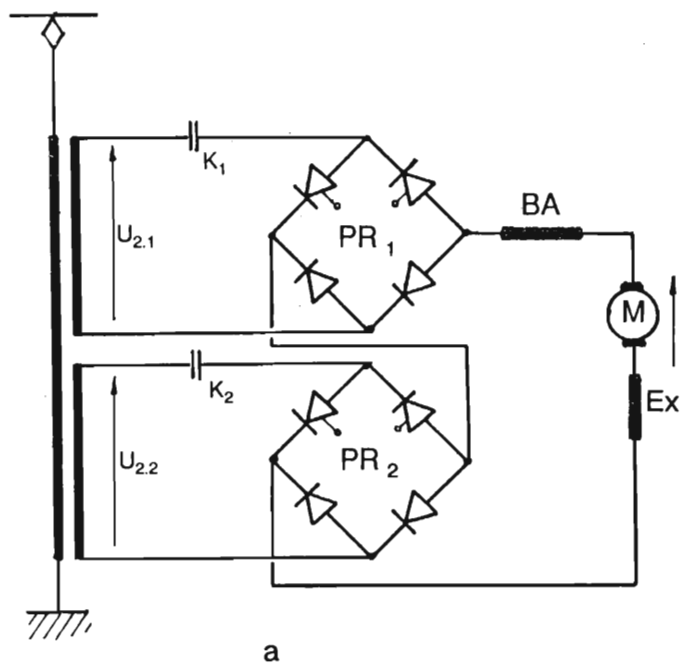


Fig. 5.8 Puente híbrido enseriado (2 niveles); a.- Diagrama de conexión; b.- Voltaje rectificado aplicado al motor.

$$\alpha_1 = 0; P_{d1} = U_{d0} \cdot I_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 \cdot I_d \quad (5.16)$$

Cuando trabaja el segundo puente tenemos:

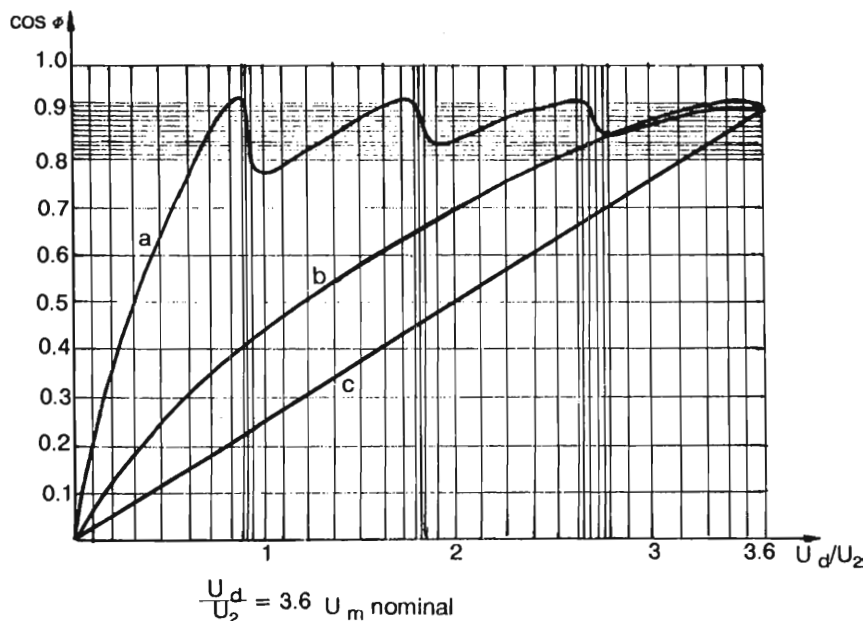


Fig. 5.9 Variación del factor de potencia para puentes tiristorizados; a.- Puentes híbrido enseriado (con cuatro niveles); b.- Puentes híbrido sencillo; c.- Puentes completamente tiristorizados.

$$\begin{aligned}
 P_{d2} &= (U_{d0} + U_{d2}) I_d = \left[\frac{2\sqrt{2}}{\pi} + \frac{\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \alpha_2) \right] U_2 \cdot I_d \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cdot I_d (3 + \cos \alpha_2)
 \end{aligned} \quad (5.17)$$

Resultando para:

$$\alpha_2 = 0; P_{d2} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cdot I_d \quad (5.18)$$

y sucesivamente:

$$P_{d3} = (5 + \cos \alpha_3) \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cdot I_d \quad (5.19)$$

$$P_{d4} = (7 + \cos \alpha_4) \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cdot I_d \quad (5.20)$$

Con su situación límite:

$$\alpha_4 = 0; P_{d4} = \frac{8\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cdot I_d \quad (5.21)$$

en donde:

$$\frac{8\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 = U_{m \text{ nominal}}$$

La corriente en el transformador se puede expresar en la siguiente forma:

$$I_1 = \frac{1}{K_t} \cdot I_d \cdot \sqrt{\frac{(\pi - \alpha_1) + 3(\pi - \alpha_2) + 5(\pi - \alpha_3) + 7(\pi - \alpha_4)}{\pi}} \quad (5.22)$$

En esta relación:

K_t = relación de transformación

I_d = la corriente que circula en el circuito de C.D., correspondiente a un solo puente, con su ángulo de encendido en cero.

I_1 = la corriente en el primario del transformador.

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ = son ángulos de encendido de cada puente. Se entiende el orden de encendido, el mismo que se vio anteriormente o sea uno sólo varía a la vez. (Ejemplo: cuando varía $\alpha_2, \alpha_1 = 0$ y $\alpha_3 = \alpha_4 = \pi$ o faltan los respectivos puentes).

De los anteriores se puede establecer la relación del factor de potencia para cada nivel de operación.

$$\cos \phi_1 = \frac{\sqrt{2}(1 + \cos \alpha_1)}{\sqrt{\pi(\pi - \alpha_1)}} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos \alpha_1)}{\pi - \alpha_1}} \quad (5.23)$$

$$\cos \phi_2 = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{(3 + \cos \alpha_2)}{4\pi - 3\alpha_2}} \quad (5.24)$$

$$\cos \phi_3 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{(5 + \cos \alpha_3)}{\sqrt{9\pi - 5\alpha_3}} \quad (5.25)$$

$$\cos \phi_4 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{(7 + \cos \alpha_4)}{\sqrt{16\pi - 7\alpha_4}} \quad (5.26)$$

La variación del factor de potencia en función de la tensión aplicada al motor $\cos \phi = f(U_m)$ se puede apreciar en la gráfica 5.9, de donde se desprende que el factor de potencia tiene un valor mejorado en el caso de utilizar puentes híbridos enseriados.

Este método también ayuda a reducir el nivel de armónicas, que por efecto de rectificación, producen los tiristores. Para explicar esto recurrimos de nuevo a la gráfica mostrada en la figura 5.8b.

Si suponemos que en el circuito PR_1 tenemos $\alpha_1 = 0$ y $\alpha_2 = \pi/2$, al motor se le aplica el voltaje $U_{2,1}$ completo y la mitad del voltaje $U_{2,2}$ este último en forma de media senoide. Se entiende que mientras mayor sea esta porción voltaje parcial aplicando, sobrepuesto a otra onda completa, mayor será el grado de deformación de la onda senoidal, lo que corresponde a la introducción de una mayor cantidad de armónicas en el circuito de alimentación.

Merece explicar que las armónicas molestas son las de corriente. La bobina de alisamiento (BA) introduce armónicas, pero mejora las condiciones de operación del motor.

Como BA tiene un valor limitado económicamente y prácticamente, la corriente será ondulatoria (ver cap. 4.3), pero de todos modos, la aplicación de un voltaje con alto contenido de armónicas, provoca mayor cantidad de armónicas de la corriente, vista del lado primario del transformador.

5.5 El freno recuperativo

Para que una locomotora con tiristores, que trabaja en un sistema monofásico a la frecuencia industrial y alta tensión, pase del régimen motor al régimen de freno debe cumplir con los siguientes:

- Si los motores son de tipo serie, deben cambiar a excitación separada. (Similar a la figura 4.28). Se recuerda que el freno recuperativo es posible solamente en el caso de puentes completamente tiristorizados. (No es posible con puentes híbridos).
- El ángulo de encendido de los tiristores debe estar comprendido entre $\pi/2 < \alpha < \pi$, de tal manera que la tensión de la máquina

en régimen generador sea en sentido contrario que en régimen de motor ($A_2 > A_1$ en la figura 5.5c).

- La tensión generada sobre la locomotora sea mayor que la tensión de la catenaria. Esto se logra mediante el sistema de control. Para la expresión de la tensión se utiliza la relación 5.1, o la relación corregida 5.2, si queremos tomar en consideración el ángulo de conmutación.

Recordamos las posibilidades de regulación (ver párrafo 3.3) para una máquina de C.D.

- Variar la tensión aplicada.
- Variar el flujo inductor.
- Variar la resistencia enseriada.

En este caso ya no se aplica la tercera alternativa. La resistencia R incluye, además de las resistencias normales (devanado de armadura, polos de conmutación, escobillas, etc), una resistencia aparte, para asegurar la protección y la estabilidad de la operación de la máquina en los regímenes transitorios que pueden surgir.

5.5.1 Regulación de la fuerza de freno a través del ángulo de encendido

Recordamos las ecuaciones de la máquina en régimen generador:

$$K\phi V = U + RI \quad y \quad F = K_1\phi I \quad (5.27)$$

Si mantenemos la excitación constante ($\phi = cte$) y deseamos mantener la fuerza de freno constante, en condiciones de voltaje invertido constante y de velocidad variable, se puede escribir:

$$K_2V = U + K_3 \quad (5.28)$$

y con la ayuda de la relación 5.1 obtenemos una relación de la siguiente forma:

$$V = K_4 \cos \alpha + K_5 \quad (5.29)$$

Esto significa una variación lineal entre la velocidad y el ángulo de encendido. La representación gráfica de la fuerza electromotriz

$E = K\phi V$, en función de la carga I , para un valor $U = \text{constante}$ ($\alpha = \text{constante}$), representa de igual manera una recta. (Ver fig. 5.10).

Sobre la misma gráfica se aprecia, para una carga constante ($I = \text{cte}$) la variación del ángulo de encendido α .

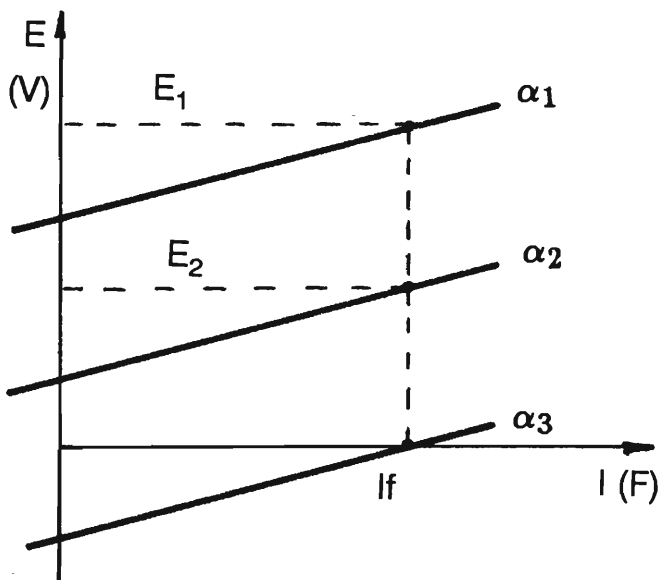


Fig. 5.10 Variación del ángulo de encendido para mantener la fuerza de freno constante hasta el paro total.

5.5.2 Regulación de la fuerza de freno a través del flujo

Si deseamos mantener constante el ángulo de encendido (α) y la corriente (I), en la relación 5.27, significa $U + RI = \text{cte}$; implicando:

$$K\phi V = \text{cte.} \quad (5.30)$$

Esto significa que para velocidades arriba de cierto límite (correspondiendo a un flujo máximo, o sea, una corriente de excitación máxima) se pueden practicar disminuciones de flujo, con

esto regulando la fuerza de freno, sin recurrir a la variación del ángulo de encendido α . (Para aclaración ver el párrafo 3.8.3).

5.5.3 El factor de potencia

El factor de potencia en régimen de freno recuperativo se define como la relación entre la potencia activa y la potencia aparente vista desde el lado primario del transformador.

La potencia activa:

$$P = U_{prom} \cdot n \cdot I_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha \cdot n \cdot I_2 \quad (5.31)$$

y la potencia aparente:

$$S = U_1 I_1 = m U_2 \frac{1}{m} \eta I_2 = U_2 \cdot \eta \cdot I_2 \quad (5.32)$$

Resultando:

$$\cos \phi = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha \quad (5.33)$$

Donde:

n = el número de máquinas en paralelo.

I_2 = la corriente en una máquina.

m = relación del transformador.

U_2 = voltaje eficaz en vacío en el secundario del transformador.

α = el ángulo de encendido de los tiristores.

La representación gráfica de esta relación es una recta teniendo sus extremos en los puntos:

$$\alpha = \frac{\pi}{2}; U_d = 0 \text{ (Ver fig. 5.5c)}$$

$$\alpha = \pi; U_d = U_d \text{ máximo.}$$

En la figura 5.11 se presenta una situación práctica; la variación del factor de potencia en función de la velocidad.

En esta gráfica se aprecia que en el tramo C.D., el factor de potencia es constante; la variación de la velocidad se realiza con la regulación de la excitación, como se describe en el párrafo 5.5.2.

En el tramo CB se varía el ángulo de encendido. Recordando que:

$$\cos \phi = \frac{U_d \cdot n \cdot I}{U_2 \cdot n \cdot I}; U_d = U_2 \cos \phi \quad (5.34)$$

La relación de la máquina (5.27), considerando la relación 5.34 se puede expresar:

$$K_6 V = U_2 \cos \phi + RI \quad (5.35)$$

o sea, el factor de potencia está variando linealmente con la velocidad hasta que se reduce a cero. (Punto B sobre la gráfica en la figura 5.11).

Esto ocurre para el ángulo de encendido $\alpha = 90^\circ$, cuando se invierte el sentido del flujo de energía.

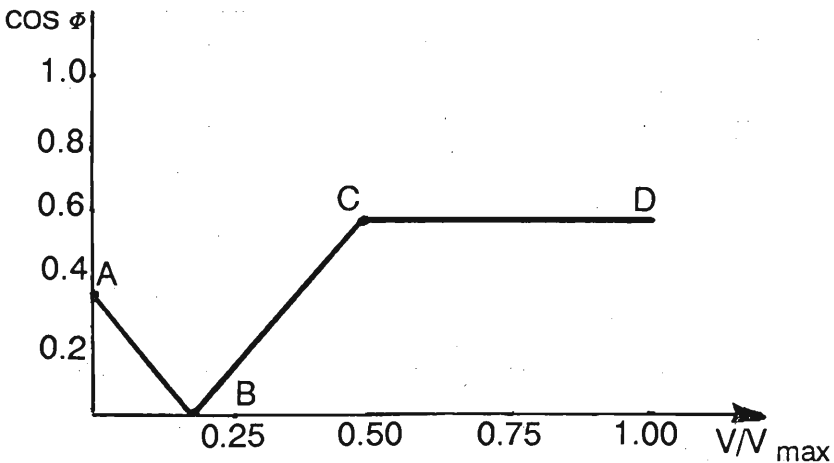


Fig. 5.11 Variación del factor de potencia con la velocidad, para el régimen de freno recuperativo.

Para velocidades menores, el factor de potencia crece linealmente, con la misma pendiente, hasta el paro total (las máquinas trabajan en régimen de motor), que se produce en el punto A sobre la gráfica.

5.6 Implicaciones del uso de los tiristores sobre las locomotoras eléctricas

En los anteriores se trataron dos tipos de locomotoras transistorizadas: con puentes completamente tiristorizados y con puentes híbridos.

Las locomotoras con puentes híbridos ofrecen la posibilidad de enseriar los puentes, mejorando su regulación y su factor de potencia, pero no dispone de freno recuperativo.

Las locomotoras con puentes completamente tiristorizados son las únicas que pueden utilizar el freno recuperativo en el sistema monocontinuo (50/60 Hz, 25KV).

A manera de conclusión sobre el uso de los tiristores sobre las locomotoras eléctricas, se puede decir entre otras que:

- Permiten un alto grado de automatización, sin recurrir a otros equipos más que en la electrónica.
- Ofrecen características prácticamente ilimitadas de regulación.
- Elimina el graduador, que es un equipo costoso y pesado. (Se construyeron algunos tipos de locomotoras tiristorizadas con un graduador más sencillo, para mejorar sus características).
- Disminuye el costo y peso del transformador principal, por la simplificación del devanado de regulación.
- Permite la regulación de la velocidad a corrientes constantes, o sea a par constante e implícitamente a fuerza de tracción constante, al mismo peso adherente.

Se puede lograr una característica envolvente sobre las características mostradas en la figura 3.32.

Si todavía no se aplica extensivamente la locomotora tiristorizada, es por algunos de los siguientes aspectos:

- La tecnología de fabricación es bastante compleja.
- Presenta menor fiabilidad, debido a las componentes electrónicas, las cuales aún no satisfacen en este dominio.
- El costo de adquisición es más elevado comparado con otros tipos de locomotoras.
- En varios países europeos existe la electrificación de los trenes en el sistema 16 2/3 Hz (Alemania, Suecia, etc.), en los cuales es difícil realizar el cambio a 50 Hz. (Son principales productores en fabricación de locomotoras eléctricas).
- En la actualidad parece que en Japón se están logrando grandes avances en este sentido y tal vez pronto tengamos mucho más que decir sobre el particular.

6. Catenaria

El conjunto de las instalaciones fijas provistas para conducir el flujo de la energía eléctrica desde el punto de alimentación, hasta el tomacorriente de la locomotora, para el caso de alimentación aérea, se denomina catenaria.

La palabra “catenaria” se deriva del término latino “catena” que significa cadena y se refiere a la curva que adopta un cable flexible, con una carga uniformemente distribuida en su extensión longitudinal, suspendido entre dos puntos de apoyo.

En la figura 6.1 se presentan los elementos esenciales de este conjunto de elementos fijos, provistos para abastecer la locomotora con la energía eléctrica requerida.

Entre otros destacan:

- El hilo de contacto (1) que tiene la función de transferir la energía entre el sistema fijo y la locomotora en movimiento.
- El cable mensajero (2), encargado de soportar el hilo de contacto entre los claros de los dos puntos de apoyo seguidos; a través de los colgadores (3).
- Los aisladores (4) provistos para aislar las partes energizadas de las partes no energizadas.
- El sistema de mensulas (5), encargado de guiar el hilo de contacto y el mensajero, el cual se puede complementar con otro mensajero, (7).
- Las estructuras o postes (6) y el sistema de conexión a tierra (8).

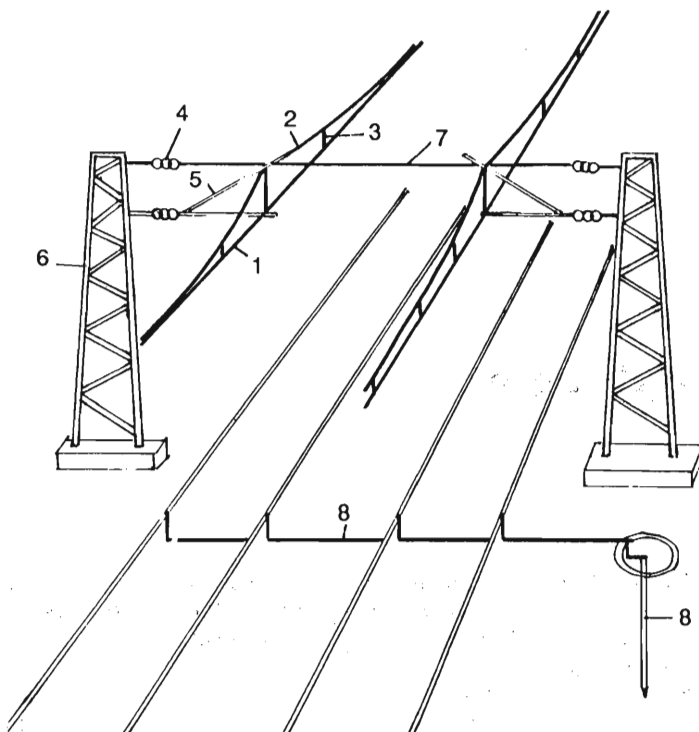


Fig. 6.1 Elementos de la catenaria; 1.- Hilo de Contacto; 2.- Cable mensajero; 3.- Colgador; 4.- Aislador; 5.- Sistema de ménsulas; 6.- Estructura soporte; 7.- Mensajero secundario; 8.- Sistema de puesta a tierra.

6.1 Elementos constructivos

6.1.1 Hilo de contacto

El hilo de contacto se construye de cobre electrolítico de temple duro, con una sección de perfil especial, para poderse conectar en grapas. (Ver fig. 6.2).

Las secciones más comunes son de 60 a 100 mm² para tensiones de 15 y 25 KV y 400 mm² o más, para corriente directa y tráfico pesado.

Definitivamente, esta sección resulta de los cálculos eléctricos y depende de la potencia y número de las locomotoras, del voltaje de alimentación, de las separaciones entre los puntos de

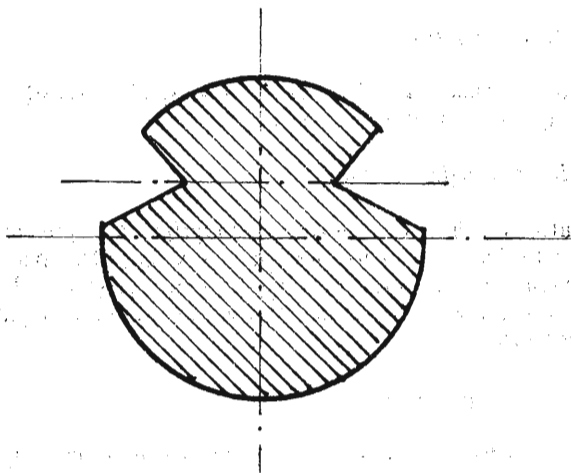


Fig. 6.2 Sección típica del hilo de contacto.

alimentación (subestaciones), etc., y cada administración ferroviaria puede normalizar su sección.

En algunos casos se utiliza el bronce de 40% de conductividad, para disminuir el gasto del hilo de contacto, por ejemplo cuando se usan placas metálicas para el tomacorriente. (Ver tabla 3.3).

6.1.2 El cable mensajero

Este elemento, usado como soporte para el hilo de contacto, es el que verdaderamente toma la forma de "catenaria". Normalmente se construye de cable de acero con una protección adecuada contra la corrosión.

En algunos casos esta protección puede ser de cobre (sistema "copperweld"), en cuyo caso este mensajero ayuda al transporte de la energía eléctrica, especialmente en C.D. En casos similares, se puede llegar a un mensajero de bronce.

6.1.3 Los colgadores

Son los encargados de soportar el hilo de contacto del cable mensajero.

Su material es bastante variable, entre otros, acero inoxidable, acero galvanizado, bronce, etc.

Están provistos en ambas extremidades de grapas con tornillos.

6.1.4. Los aisladores

Son materiales eléctricos típicos, encargados de aislar las partes vivas, de los elementos de soporte.

6.1.5 El sistema de ménsulas

Junto con los mensajeros secundarios, si estos existen, está constituido por elementos rígidos y flexibles, para soportar adecuadamente el hilo de contacto y el mensajero. Todos estos elementos metálicos deberán estar debidamente protegidos contra la corrosión.

6.1.6 La estructura soporte

Se construye de elementos metálicos estructurales, en cuyo caso deberán estar debidamente protegidos contra la corrosión, o de concreto armado.

En caso de puentes o túneles, estos elementos se adaptan a cada situación.

6.1.7 El sistema de puesta a tierra

Sirve para igualar los voltajes entre la vía y la tierra adyacente, en primer lugar para evitar accidentes y en segundo lugar, para derivar parte de la corriente de trabajo, a través de la tierra.

Se pueden utilizar varillas “copperweld”, reguiletes, etc., métodos que se usan comúnmente como toma de tierra. En su diseño se debe cuidar tanto su resistencia mínima, como las secciones del conjunto de conductores, para que éstos no se sobrecalienten.

6.2 Cálculo mecánico de la catenaria

6.2.1 Fórmulas exactas

En la figura 6.3 se presenta una catenaria típica, para la cual se escriben las relaciones, en la condición de equilibrio.

$$T \cos\theta - H = 0 \quad (6.1)$$

$$T \text{ Sen} \theta - p\ell = 0 \quad (6.2)$$

Donde se notó:

T = tensión mecánica en el punto de apoyo B.

ℓ = longitud del Arco OB.

H = tensión mecánica en el punto inferior de la catenaria.

p = peso uniformemente distribuido del cable por unidad de longitud.

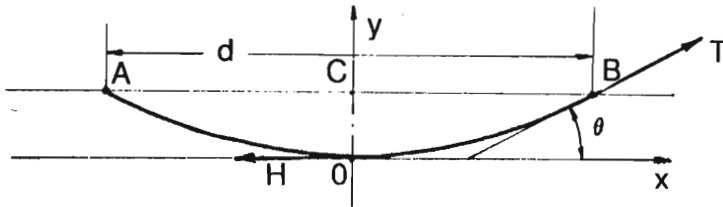


Fig. 6.3 Catenaria con apoyos a la misma altura.

De este sistema de ecuaciones se puede deducir:

$$tg\theta = \frac{dy}{dx} = \frac{p\ell}{H} \quad (6.3)$$

$$dy = \frac{p\ell}{H} dx \quad (6.4)$$

Haciendo uso de una serie de sustituciones y transformaciones, se llega a las siguientes relaciones:

$$y = \frac{H}{p} \cosh\left(\frac{px}{H}\right) \quad (6.5)$$

$$\ell(x) = \frac{H}{p} \sinh\left(\frac{px}{H}\right) \quad (6.6)$$

$$T(x) = H \cosh\left(\frac{px}{H}\right) \quad (6.7)$$

Notando con:

d = la separación entre dos soportes

f = la flecha o sea el segmento OC en la figura 6.3.

y haciendo las situaciones pertinentes, se encuentran:

$$f = \frac{H}{p} \cosh\left(\frac{p \cdot d}{2H}\right) \quad (6.8)$$

$$L = \frac{2H}{p} \sinh\left(\frac{p \cdot d}{2H}\right) \quad (6.9)$$

$$T_{(B)} = H \cosh\left(\frac{p \cdot d}{2H}\right) \quad (6.10)$$

Estas son las fórmulas exactas de cálculo para la catenaria de un cable flexible, con peso por unidad uniformemente distribuido.

6.2.2 Fórmulas parabólicas

Por lo general en la práctica, se hace uso de la fórmula de la parábola, la cual es más sencilla, introduciendo errores despreciables. Estas fórmulas son:

$$f = \frac{p \cdot d^2}{8H} \quad (6.11)$$

$$L = d + \frac{8f^2}{3d} = d + \frac{8}{3d} \frac{p^2 d^4}{8^2 H^2} = d + \frac{p^2 d^3}{24H} \quad (6.12)$$

$$T = H + \frac{p^2 d^2}{8H} \quad (6.13)$$

Para el caso de apoyo a alturas desiguales (ver fig. 6.4), haciendo los razonamientos y las transformaciones pertinentes, resulta:

$$f_1 = f \left(1 - \frac{h}{4f}\right)^2 \quad (6.14)$$

$$f_2 = f \left(1 + \frac{h}{4f}\right)^2 \quad (6.15)$$

En donde f se calcula como si se tratara de apoyos al mismo nivel, mientras las demás relaciones quedan en la misma forma, con ligeras aproximaciones, los cuales para fines prácticos normalmente no presentan mucha importancia.

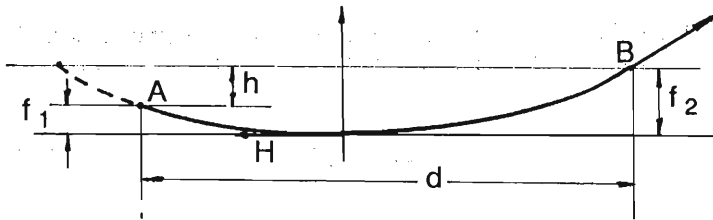


Fig. 6.4 Catenaria con apoyos a alturas desiguales.

6.3 Otras consideraciones para el diseño mecánico de la catenaria

6.3.1 Depósitos de hielo

En los climas en donde se pueden presentar heladas, se deberá considerar el aumento del peso por unidad de longitud, tanto del hilo de contacto, como el propio mensajero, con la estimación de la deposición del respectivo hielo.

6.3.2 Presión del viento

En la carga del mensajero debe incluirse también el efecto del viento.

La fuerza del viento actúa horizontalmente sobre el conjunto hilo de contacto-mensajero.

En la figura 6.5a se aprecian las fuerzas que actúan sobre cada elemento de la catenaria.

En el caso de deposición de hielo, se aumentarán las fuerzas F_{p1} , F_{p2} respectivamente (se considerarán también los colgadores

con sus accesorios, inclusive sus deposiciones de hielo), como peso distribuido del elemento de catenaria.

En la gráfica 6.5b, se presenta la gráfica de las fuerzas resultantes globales por unidad de longitud.

Es fácil comprobar que:

$$F_R = \sqrt{(\sum F_p)^2 + (\sum F_v)^2} \quad (6.16)$$

En este caso la catenaria ya no se forma en un plano vertical, sino en un plano que forma un ángulo θ con la vertical. Resulta:

$$\tan \theta = \frac{\sum F_v}{\sum F_p} \quad (6.17)$$

Donde:

$\sum F_v$ = representa la sumatoria de la presión del viento sobre todos los elementos de la catenaria.

La fuerza dinámica producida por el viento sobre una superficie, está dada por la siguiente expresión:

$$F_v = K_f \frac{\rho V^2}{2g} \quad (6.18)$$

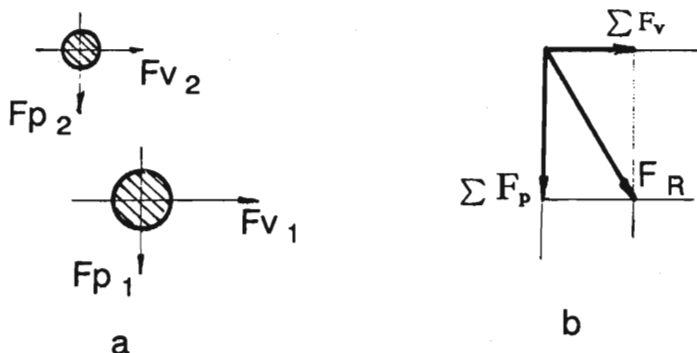


Fig. 6.5 Las fuerzas que actúan sobre la catenaria; a.- Sección transversal; b.- Diagramas de fuerzas.

En donde:

K_f = es el factor de forma de la superficie.

q = es el peso específico del aire. ($q = 1.293 \text{ Kg/m}^3$ a 0°C y 760 mm Hg).

V = es la velocidad del viento, en m/seg.

g = es la aceleración gravitacional, igual a 9.81 m/s^2 .

El factor de forma tiene los siguientes valores:

$K_f = 2$ para superficies planas.

$K_f = 1.2$ para superficies cilíndricas lisas.

$K_f = 1.45$ para cables.

Considerando que q es ligeramente menor (como promedio) debido a la temperatura más elevada y sustituyendo a los demás valores, la relación anterior queda:

$$F_v = K_f \frac{V^2}{16} (kgf/m^2) \quad (6.19)$$

Debido al fenómeno de las ráfagas del viento, las cuales tienen un frente reducido, se introduce otro coeficiente K_1 , el cual en la práctica se toma alrededor de 0.6.

Con estos datos, para calcular la fuerza del viento sobre el conjunto de la catenaria, entre dos estructuras de soporte consecutivas, se puede emplear la siguiente relación:

$$F_v = 0.6 \cdot \left(\sum_1^n F_v \right) \quad (6.20)$$

donde n es el número de elementos que constituye la catenaria (hilo de contacto, mensajero, colgadores, etc.).

6.3.3 La ecuación de cambio de estado

Una catenaria diseñada para operar a una determinada temperatura, sufre modificaciones serias al variar este parámetro, debido al fenómeno de dilatación térmica.

Para tomar en consideración este fenómeno, se hace uso de una relación de cambio de estado. Para simplificar las relaciones, se hace uso de la fórmula de la parábola y se considera $T=H$.

Considerando la situación inicial P_1, θ_1, T_1 , y L_1 (guardando la misma simbología) y la situación final P_2, θ_2, T_2 respectivamente L_2 , se puede escribir:

$$\Delta L = L_2 - L_1 = d + \frac{P_2^2 d^3}{24 T_2^2} - d - \frac{P_1^2 d^3}{24 T_1^2} = \frac{d^3}{24} \left(\frac{P_2^2}{T_2^2} - \frac{P_1^2}{T_1^2} \right) \quad (6.21)$$

Esta diferencia se debe a dos fenómenos distintos: el primero es la dilatación térmica, o sea:

$$\Delta L_\theta = L_1 \propto (\theta_2 - \theta_1) \quad (6.22)$$

y el segundo es el alargamiento elástico conforme a la ley de Hooke, o sea:

$$\Delta L_T = L_1 \frac{T_2 - T_1}{E.A} \quad (6.23)$$

En estas relaciones:

α = el coeficiente de dilatación lineal con la temperatura.

θ_1, θ_2 = la temperatura inicial, respectivamente final.

E = el módulo de elasticidad del material.

A = área del elemento estructural respectivo (en este caso el mensajero).

Igualando los términos:

$$\Delta L = \Delta L_\theta + \Delta L_T = \frac{d^3}{24} \left(\frac{P_2^2}{T_2^2} - \frac{P_1^2}{T_1^2} \right) \quad (6.24)$$

y haciendo una serie de transformaciones, resulta la ecuación de cambio de estado, (o la ecuación de Blondel).

$$T_2^3 + \left[\frac{d^2 \cdot P_1^2 \cdot A \cdot E}{24 T_1^2} + A \cdot E \cdot \alpha (\theta_2 - \theta_1) - T_1 \right] T_2^2 - \frac{d^2 \cdot P_2^2 \cdot A \cdot E}{24} = 0 \quad (6.25)$$

Conforme a esta ecuación varía la tensión en el mensajero e implícitamente la flecha.

El mensajero se debe diseñar para aguantar el mayor esfuerzo, o sea mínima temperatura y máxima carga (peso propio de la catenaria, depósitos de hielo combinados con la fuerza del viento).

Por otro lado, la flecha del hilo de contacto debe ser mínima. (Ver fig. 6.6. y párrafo 3.7), tanto en el plano vertical como en el plano horizontal.

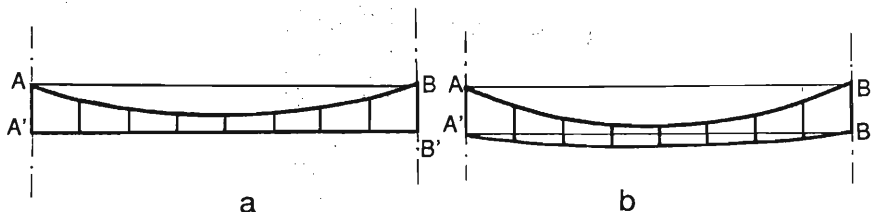


Fig. 6.6 Variación de la Catenaria debido al fenómeno de dilatación térmica; a.- estado a las condiciones 1; b.- estado a las condiciones 2.

6.3.4 Compensador de tensión y flecha

Para compensar la flecha en el plano vertical (mantener el hilo de contacto lo más horizontal posible), se puede emplear un anclaje compensador. En tal caso ya no se utilizaría más la ecuación de cambio de estado. En la figura 6.7 se aprecia un sistema para tensar, tanto el mensajero, como el hilo de contacto. Los tramos tensados son de 1200 a 1500 m.

6.3.5 El zig-zag de la catenaria

Con el fin de no desgastar la placa del pantógrafo en un mismo lugar, el hilo de contacto deberá tener una forma de zig-zag, alrededor del eje de la vía, desviación que se logra con la colocación en los puntos de apoyo. (Ver fig. 6.8).

Si consideramos que la placa de contacto del pantógrafo tiene una longitud ℓ , la desviación a del centro de la vía hasta el punto de apoyo se puede tomar como

$$a = \frac{\ell}{4} \quad (6.26)$$

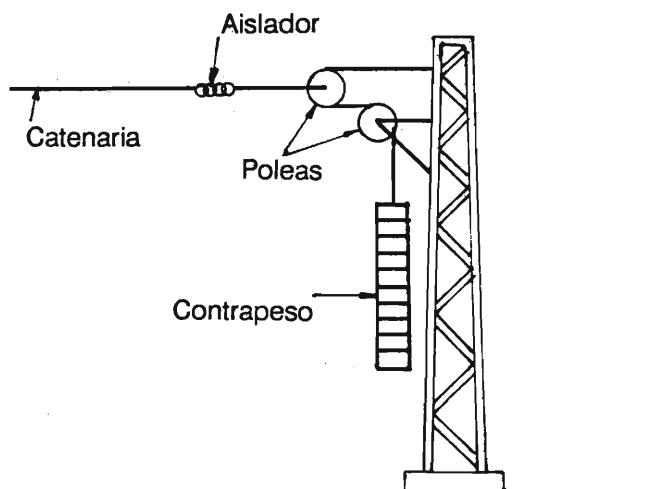


Fig. 6.7 Anclaje compensador de tensión mecánica en la catenaria.

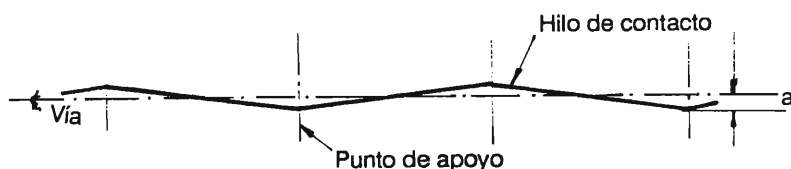


Fig. 6.8 El zig-zag del hilo de contacto.

6.3.6 Separación de apoyos en línea recta

La separación entre las estructuras o puntos de apoyo está limitada por la desviación del hilo de contacto por la fuerza del viento.

Se calcula la flecha en un plano inclinado con la fuerza resultante (ver fig. 6.5) y se cuida su componente horizontal, la cual no deberá ser mayor que a .

6.3.7 Separación de apoyos en curvas

Un cuidado especial se debe tener con la colocación de la catenaria en las curvas, para que el hilo de contacto no brinque fuera del pantógrafo.

En la figura 6.9 se presenta el radio de curvatura del eje de la vía, el cual se supone que coincide con el eje del pantógrafo.

Supongamos la distancia a , que se puede permitir como máximo entre el centro del pantógrafo y su punto de contacto con el hilo. En el triángulo OBC se puede escribir:

$$(R + a)^2 = (R - a)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (6.27)$$

y resolviendo resulta que:

$$d = 4\sqrt{aR} \quad (6.28)$$

lo que limita la distancia entre los puntos de apoyo del hilo de contacto, e implícitamente el mensajero, en función del radio de

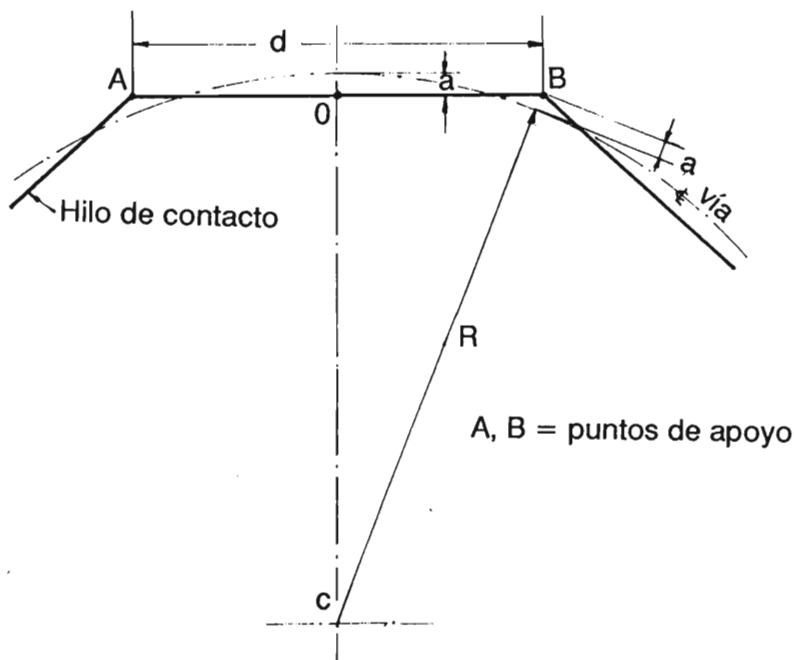


Fig. 6.9 Separación de puntos de apoyo en curvas.

curvatura de la vía y el ancho útil de la placa de contacto del pantógrafo.

Por lo general, la catenaria está inclinada en las curvas como se puede apreciar en la figura 6.10.

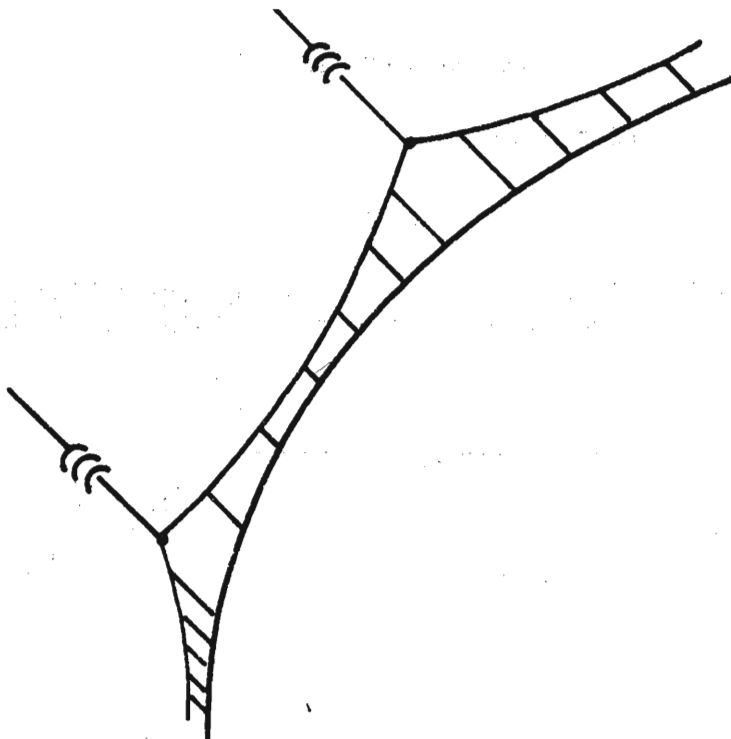


Fig. 6.10 Catenaria inclinada en curva.

6.3.8 Catenarias complejas

En la figura 6.11 se presenta un ejemplo de catenaria compuesta, la cual incluye: mensajero principal (1), mensajero secundario (2), hilo de contacto (3), mensajero terciario (4), aisladores (5), varios tipos de colgadores (6), y estructuras de apoyo (7). Los colgadores entre el hilo de contacto y el mensajero terciario son unos clips

especiales, que le permite al hilo de contacto levantarse localmente, al paso del pantógrafo.

Se vio en el párrafo 3.7 que tiene mucha importancia la inercia de las masas que se tienen que mover sobre la vertical, esencialmente para trenes de alta velocidad.

Con una catenaria compuesta, el hilo de contacto puede ser más ligero, utilizando también los mensajeros para el transporte de energía, (para efectos de caída de voltaje y pérdidas de energía).

Una catenaria compuesta se utiliza en Japón, para velocidades del orden de 225 Km/h.

En el caso de los trenes de altas velocidades se debe cuidar la frecuencia de oscilación de la catenaria, para evitar el fenómeno de resonancia. Para tal efecto se pueden introducir amortiguadores especiales.

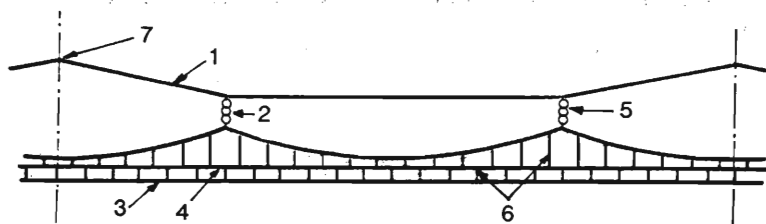


Fig. 6.11 Catenaria compuesta.

6.4 Cálculo eléctrico de la catenaria

Como cualquier alimentador eléctrico, la catenaria debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Que la caída de voltaje entre la subestación y el pantógrafo de la locomotora no rebase un límite máximo establecido (ver párrafo 3.2.8.3 y la tabla 3.2).
- Que la corriente máxima, en ninguna situación, no rebase la limitación térmica del hilo de contacto.
- Que la pérdida de potencia (o energía) en la catenaria no rebase un determinado porcentaje (por lo general 5%).

La condición que implica la capacidad térmica del hilo de contacto, está indicada por su fabricante, (aquí no intervienen otros medios de transporte de energía, como sería el mensajero) y depende tanto del material, como de la temperatura de medio ambiente.

6.4.1 Cálculo por caída de voltaje

De conformidad con la ley de Ohm, se define la caída de voltaje sobre un elemento conductor como:

$$\Delta U = Z I \text{ (V)} \quad (6.29)$$

En donde:

Z = la impedancia del elemento considerado, en ohms.

I = la corriente que circula en el respectivo elemento, en amperes.

Para calcular la impedancia se requiere conocer sus componentes o sea la resistencia y la reactancia inductiva. La reactancia capacitiva no se puede despreciar: (conviene trabajar con los parámetros por kilómetro).

La resistencia de la catenaria por Km es:

$$R_o = \rho \frac{1000}{A} \text{ (ohms/Km)} \quad (6.30)$$

En donde:

ρ = es la resistividad específica del material en ohms $\frac{mm^2}{m}$

A = es el área del conductor, considerada uniforme en su longitud, en mm^2 .

TABLA 6.1
VALORES MAS COMUNES DE LA RESISTIVIDAD

| <i>Material</i> | <i>Resistividad a 20° C ($\frac{ohms \cdot mm^2}{m}$)</i> | <i>Conductividad IACS * (%)</i> |
|-----------------|--|-------------------------------------|
| Cobre suave | $\frac{1}{58} = 0.01724$ | 100% |
| Cobre duro | 0.01777 | 97% |
| Aluminio | 0.02826 | 61% |
| Acero | 0.14 | 12.3% |

* IACS = International Annealed Copper Standard.

En el caso que el mensajero se utiliza también para transporte de energía, se considerarán como resistencia de la catenaria, la

resultante de los dos elementos en paralelo y en el caso de catenaria compuesta, se deberán considerar todos los elementos en paralelo, según la siguiente relación:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \frac{1}{R_n} \quad (6.31)$$

La resistencia de la catenaria constituye solamente una parte de la resistencia del circuito, por que hay que recordar que la corriente retorna, una parte por los rieles y otra parte por la tierra.

La resistencia en corriente directa de las vías, por kilómetro, se calcula empleando la misma relación

$$R_V = \rho \frac{1000}{2A} (\text{Ohms}/\text{km}) \quad (6.32)$$

en este caso ρ es la resistividad del acero y A es la sección del riel.

Además, se hacen las siguientes aclaraciones: por un lado los rieles no son continuos, por lo cual se considerará que la resistencia se debe duplicar y por otro lado, consideramos que sólo aproximadamente la mitad de la corriente de retorno circula por los rieles, la otra mitad circulando a través de la tierra, de tal manera, que la resistencia de retorno será considerada la que resulte de la relación anterior.

La resistencia por kilómetro de recorrido será:

$$R_{CD} = R_C + R_V (\text{Ohms}/\text{Km}) \quad (6.33)$$

Esta relación es válida solamente para sistemas de transporte en corriente directa.

Para el caso de corriente alterna se debe tomar en cuenta el "efecto peculiar". Recordamos que este fenómeno es mínimo para secciones pequeñas y materiales no magnéticos, pero en el caso de los rieles, esto si tiene importancia.

Se considera como otra resistencia suplementaria (como si fuera en serie con las dos anteriores), conforme a la fórmula empírica, dada por Huldshiner.

$$R_K = \frac{f \cdot A}{28} (\text{ohms}/\text{Km}) \quad (6.34)$$

En donde:

f = es la frecuencia en Hz.

A = es la sección de un riel en mm^2 .

La resistencia por kilómetro de recorrido, para corriente monofásica es:

$$R_{CA} = R_C + R_V + R_K \text{ (ohms/Km)}. \quad (6.35)$$

La reactancia inductiva por kilómetro de recorrido es:

$$X = \omega L \text{ (ohms/Km)} \quad (6.36)$$

En donde:

$$\omega = 2\pi f$$

L = inductancia por kilómetro de recorrido, en H/Km.

En el caso de una vía simple, se puede utilizar una relación semiempírica (de Karl Sachs):

$$L = \frac{2}{10^4} \left(\ln \frac{H^2}{R_1 D \cdot 0.78 R_2} + \frac{\mu}{8} \right) \text{ (H/Km)} \quad (6.37)$$

En donde:

H y D son conforme a la figura 6.12a, en m.

R_1 = radio medio geométrico de los dos rieles.

R_2 = radio medio geométrico de la catenaria.

$\mu = 25 - \frac{f}{2.8}$ = permeabilidad magnética de los rieles.

En el caso de una vía doble, se puede utilizar otra relación semiempírica (de B.S. Sirocogorov):

$$L = \left[0.25(1 + 0.25\mu) + 2.3 \ln \frac{a^2 \cdot c.d.}{R_2 \cdot e \cdot \sqrt{R_1 g_h} \cdot \sqrt{m(h + g)}} \right] 10^{-4} \quad (6.38)$$

En donde:

R_1 = radio medio geométrico de los cuatro rieles.

R_2 = radio medio geométrico del conjunto de la catenaria.

μ = el mismo que para la relación anterior.

a, c, d, e, g, h, m = distancias conforme a la figura 6.12b, en m.

L = inductancia, en ohms/km.

Teniendo los valores de la resistencia y la reactancia inductiva en ohms por kilómetro, se calcula la impedancia por kilómetro.

$$Z = \sqrt{R^2 c.a. + X^2} \quad (\text{ohms}/Km) \quad (6.39)$$

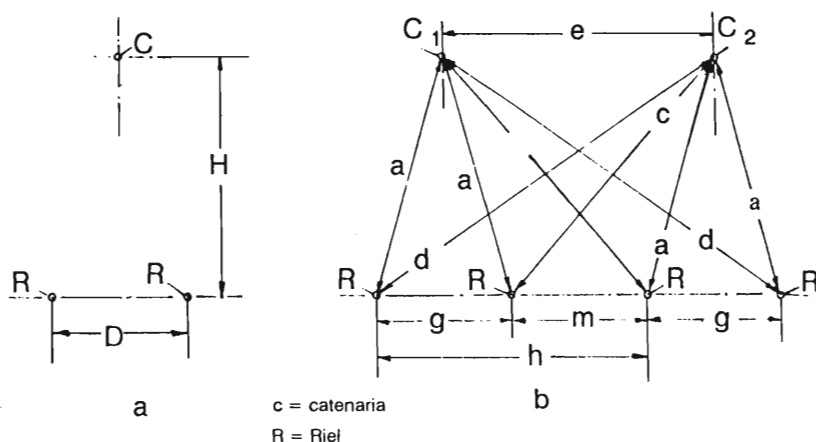


Fig. 6.12 Esquema para cálculo de la reactancia inductiva; a.- vía sencilla; b.- vía doble.

Si consideramos un tramo de vía alimentado desde una subestación sobre el cual circula n locomotoras, la caída de voltaje total, para la última locomotora será:

$$\Delta U_n = Z \sum_{i=1}^n I_i \quad (V) \quad (6.40)$$

En donde:

Z = la impedancia de la vía en ohms/km.

l, I = la distancia en km. respectivamente la corriente en A, conforme a la figura 6.13.

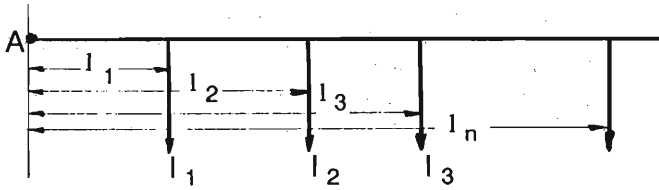


Fig. 6.13 Diagrama para cálculo de la caída de voltaje.

Para la locomotora K, la caída de voltaje se puede expresar como:

$$\Delta U_K = Z \sum_i^K l_i I_i + Z l_k \sum_{i=k+1}^n I_i (V) \quad (6.41)$$

En el caso que un tramo de vía tenga dos puntos de alimentación en los extremos, se puede discriminar (partir en dos) para llegar a la situación a dos casos similares c/u al caso estudiado anterior.

Este estudio nos ayuda al diseño de la catenaria. Si la sección de alimentación de la catenaria está decidida, suponiendo una densidad de tráfico determinado (dato inicial del proyecto), se puede calcular la separación entre las subestaciones de alimentación a la catenaria, sucesivas a lo largo de la vía.

6.4.2 Cálculo por pérdida de potencia

La potencia real absorbida de una locomotora es:

$$P_K = Re[(U - \Delta U_K) \cdot I_K] (W) \quad (6.42)$$

y la potencia real absorbida de todas las locomotoras será:

$$P_u = \sum_i^n P_k = Re[\sum_i^n (U - \Delta U_k) \cdot I_k] (W) \quad (6.43)$$

la pérdida de potencia se calcula como:

$$\begin{aligned}\Delta P &= P_s - P_u = R_e \left[U \sum_l^n I_k - \sum_l^n (U - \Delta U_k) \cdot I_k \right] \\ &= R_e \left[\sum_l^n \Delta U_k \cdot I_k \right] \quad (W)\end{aligned}\tag{6.44}$$

En porcentajes será:

$$P(\%) = \frac{\Delta P}{P_U} \cdot 100 = \frac{R_e (\sum_l^n \Delta U_k \cdot I_k)}{R_e (U \sum_l^n I_k)} \cdot 100 \tag{6.45}$$

Se recomienda que este parámetro quede abajo del 5% en el diseño de los sistemas de transporte eléctrico.

BIBLIOGRAFIA

1. P. Cartianu. *Manualul inginerului electrician* Vol. VI. Editura Tehnica. Bucuresti 1958.
2. N. Condacse. *Locomotive si trenuri electrice*. Editura didactica si pedagogica Bucuresti 1980.
3. D. G. Fink. *Standard handbook for electrical engineers*. Eleventh edition. McGraw-Hill.
4. Fitzgerald, Kingsley, Kusko. *Electric machinery*. Third edition. McGraw-Hill.
5. P. Heiny; R. Nandy; L. Martel. *Technologie d'Electricité*. Tome 5, premier livre Les Editions Foucher.
6. SNCF. *Les chemins de fer en France*. SDE Conseils en information 46, rue Bichat-75010, París.
7. F. M. Togno. *Ferrocarriles*. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. Ed. 1980.
8. G. Tornerud-ASEA. "Locomotoras eléctricas y trenes para los 80's". Conferencia presentada en México, D.F. 1980.
9. J. Viqueira Landa. *Redes eléctricas*. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. 1970.

Índice de Figuras

Fig. 1.1 Esquema de las instalaciones principales de un ferrocarril eléctrico.

Fig. 1.2 Esquema de electrificación en corriente directa.

Fig. 1.3 Corrientes de dispersión y zona anódica.

Fig. 1.4 Dren Eléctrico directo.

Fig. 1.5 Protección catódica.

Fig. 1.6 Esquema de electrificación en corriente alterna y frecuencia industrial.

Fig. 1.7 Esquema mecánico de una locomotora.

Fig. 1.8 Ejemplos de Locomotoras eléctricas.

Fig. 2.1 Diagrama de fuerzas y pares sobre el eje motriz.

Fig. 2.2 Característica del esfuerzo de tracción en función del patinaje.

Fig. 2.3 Valores experimentales del coeficiente de adherencia.

Fig. 2.4 Gráfica de recorrido de un tramo.

Fig. 3.1 Diagrama elemental del circuito de fuerza para una locomotora de corriente directa.

Fig. 3.2 Diagrama de los circuitos principales de fuerza de una locomotora eléctrica de corriente directa, tipo B – B.

Fig. 3.3 Diagrama de los contactos contra posiciones de velocidad.

Fig. 3.4 Devanados principales de una máquina de corriente directa.

Fig. 3.5 Pérdidas en un motor de corriente directa tipo serie.

Fig. 3.6 Característica típica de magnetización para una máquina de c.d.

Fig. 3.7 Característica de velocidad $n(I)$ para un motor tipo serie.

Fig. 3.8 Característica típica del par $M(I)$ para un motor tipo serie.

Fig. 3.9 Característica de la potencia útil para un motor tipo serie.

Fig. 3.10. Característica de la eficiencia típica para una máquina de corriente directa.

Fig. 3.11. Característica mecánica $M_{(n)}$ para un motor tipo serie.

Fig. 3.12 Característica de la velocidad $n(I)$ y del par $M_{(I)}$ para un motor shunt.

Fig. 3.13 Característica mecánica $M_{(n)}$ para un motor shunt.

Fig. 3.14 Características $V_{(I)}$ y $F_{(I)}$ universales, para motores tipo serie.

Fig. 3.15 Comparación de la variación de la corriente (ΔI), para un motor serie y un motor shunt, debido a la misma variación del par (ΔM).

Fig. 3.16 La variación comparativa del par (ΔM), debido al desgaste desigual de las ruedas motrices.

Fig. 3.17 La elasticidad del motor serie y motor shunt: a.- carga diferente b.- perfil diferente.

Fig. 3.18 Necesidad para crear otras características de operación.

Fig. 3.19 El diagrama de conexión de seis motores a 3KV; a - conexión serie; b- conexión serie-paralelo; c - conexión paralelo (a tensión nominal).

Fig. 3.20 Diagrama presentando el método de paso de serie a paralelo por cortocircuito.

Fig. 3.21 Curvas de operación para el paso de serie a paralelo por corto circuito. Las letras a,b,c,d,e,f, corresponden a la Fig. 3.20.

Fig. 3.22 Diagrama presentando el método de paso de serie a paralelo por puente; a - circuito de fuerza; b,c,d,e - secuencia de conexión; f - curvas de operación.

Fig. 3.23 Características $V(I)$ para las conexiones serie (0.25U), serie-paralelo (0.5U) y paralelo (U).

Fig. 3.24 Característica $F(V)$ para las conexiones serie (.25), serie-paralelo (.5U) y paralelo (U).

Fig. 3.25 Diagrama mostrando el método de reducción del campo mediante el seccionamiento del devanado de excitación.

Fig. 3.26 Diagramas para reducción del campo, desviando parcialmente la corriente de armadura; a- Un nivel con shunt resistivo; b- Dos niveles con shunt resistivo; c- shunt inductivo.

Fig. 3.27 Construcción gráfica de la característica $V(I)$ de campo reducido, partiendo de la característica nominal $V(I)$.

- Fig. 3.28 Característica $F(I)$ para campo normal y campo reducido.
- Fig. 3.29 Características $F(V)$ para campo nominal y campo reducido.
- Fig. 3.30 La capacidad de utilización de una locomotora con reducción de campo.
- Fig. 3.31 Características $V(I)$ con resistencias introducidas en el circuito.
- Fig. 3.32 Ensamble de las características de tracción de una locomotora eléctrica.
- Fig. 3.33 Característica $V(I)$.
- Fig. 3.34 Cálculo grafoanalítico del reóstato para arranque.
- Fig. 3.35 El consumo de energía para dos motores, arranque serie y paralelo.
- Fig. 3.36 El consumo de energía para arranque serie, serie-paralelo y paralelo.
- Fig. 3.37 Diagrama de alimentación de los servicios auxiliares.
- Fig. 3.38 Esquema del retorno de la corriente.
- Fig. 3.39 Pantógrafo simétrico.
- Fig. 3.40 Pantógrafo asimétrico.
- Fig. 3.41 Variación de la fuerza que el pantógrafo ejerce sobre el hilo de contacto, en función de la velocidad.
- Fig. 3.42 Ejemplo de disposición para los circuitos de mando sobre una locomotora eléctrica.
- Fig. 3.43 Freno reostático con motor serie: a - Régimen de motro; b - régimen de freno reostático; c - Estabilidad en régimen de freno reostático.
- Fig. 3.44 Conexión de dos máquinas tipo serie, en paralelo, para freno reostático: a - Conexión paralelo normal; b - Conexión paralelo con excitaciones cruzadas.
- Fig. 3.45 Diagramas de conexión para freno reostático a una locomotora B - B; b - Una locomotora C-C.
- Fig. 3.46 La característica $E(I)$ para una máquina tipo serie a distintas velocidades.
- Fig. 3.47 La construcción gráfica de la curva $Ff(V)$ para un valor de resistencia R_f dado.
- Fig. 3.48 Característica $E(I)$ con carga, considerando la reacción de armadura.
- Fig. 3.49 Características de freno reostático para varios valores de la resistencia eléctrica R_f .

Fig. 3.50 Diagrama de principio para freno reostático, con excitación independiente, correspondiente a una locomotora B-B.

Fig. 3.51 Características de freno reostático para excitación independiente.

Fig. 3.52 La inestabilidad eléctrica de la máquina serie, operando en régimen de freno recuperativo.

Fig. 3.53 La estabilidad eléctrica, en régimen de freno recuperativo de: a - máquina con excitación diferencial; b - máquina con excitación separada.

Fig. 3.54 El comportamiento en régimen de freno recuperativo de: S- máquina con excitación separada. D- máquina con excitación diferencial.

Fig. 3.55 Características $V(I)$ en régimen de freno recuperativo: a- máquina con excitación separada. b- máquina con excitación diferencial.

Fig. 3.56 Freno recuperativo con excitación separada y grupo excitatriz diferencial.

Fig. 3.57 Freno recuperativo con excitación separada, grupo excitatriz y resistencia para estabilización.

Fig. 3.58 características $F_f(V)$ para varios valores de corriente de excitación.

Fig. 3.59 El dominio de utilización del freno recuperativo.

Fig. 4.1 Circuito principal de fuerza sobre una locomotora monocontinua.

Fig. 4.2 Pastilla rectificadora. a- Barrera de potencial; b - Aplicación de tensión inversa; c- Aplicación de tensión directa.

Fig. 4.3 Características corriente - tensión de un rectificador de silicio de alta potencia.

Fig. 4.4 Válvula rectificadora de silicio.

Fig. 4.5 Definición de las corrientes de un diodo.

Fig. 4.6 Definición de las tensiones de un diodo.

Fig. 4.7 Eficiencias comparativas de algunos semiconductores.

Fig. 4.8 Conexión serie de dos diodos.

Fig. 4.9 Diagramas de conexión de los diodos; a - conexión "push pull"; b - conexión en "puente".

Fig. 4.10 Curvas de voltaje y corriente en el circuito de rectificación.

Fig. 4.11 Los voltajes en el circuito rectificador-motor y la corriente ondulatoria.

Fig. 4.12 El factor de potencia de una locomotora, función de su velocidad.

Fig. 4.13 Diagrama para la composición de la unidad rectificadora.

Fig. 4.14 Característica típica de sobrecarga para un diodo de silicio; a - arranque en frío (25°C); b- arranque en caliente (100°C).

Fig. 4.15 Sobretensión de conmutación de un diodo.

Fig. 4.16 Protección del rectificador por fusibles; a- fusible en cada ramal; b- fusibles en el circuito de C.A.; c- un fusible en C.A. y un fusible en C.D.

Fig. 4.17 Las pulsaciones del par, correspondientes a un motor de corriente ondulatoria.

Fig. 4.18 Diagrama de regulación de voltaje sobre A.T.; a- Diagrama de principio; b - Diagrama práctico.

Fig. 4.19 Diagrama de principio para la regulación del voltaje en A.T.

Fig. 4.20 Secuencias de operación para pasar de una tensión U a la siguiente posición; a- posición estable con U ; b y c - posiciones de paso; d- posición estable con $U + \frac{1}{2}U$.

Fig. 4.21 El diagrama de principio del graduador tipo BBC.

Fig. 4.22 El diagrama de principio del graduador tipo ASEA.

Fig. 4.23 Los núcleos y la disposición de los devanados de un transformador de locomotora.

Fig. 4.24 Interdependencia entre las características $V(I)$ y $V(U)$ para el motor "serie".

Fig. 4.25 Método gráfico para determinar los escalones de voltaje para el arranque y regulación del motor serie.

Fig. 4.26 Alimentaciones para los servicios auxiliares.

Fig. 4.27 El principio del convertidor ARNO.

Fig. 4.28 Diagrama de principio del convertidor monofásico estático. a.- Devanado "d" con sus taps; b.- Fasores en el mismo ángulo; c.- Fasores obtenidos con un condensador.

Fig. 4.29 El diagrama eléctrico del freno reostático, utilizando el circuito de fuerza de un motor para la excitación.

Fig. 4.30 Características de freno reostático para una locomotora tipo monocontinua.

Fig. 5.1 Tiristor elemental en un circuito de corriente alterna.

Fig. 5.2 Características del tiristor en estado bloqueado.

Fig. 5.3 Característica de bloqueo de un tiristor.

Fig. 5.4 Angulo de encendido y tiempo de conducción de un tiristor.

Fig. 5.5 Puente completamente tiristorizado. a.- Diagrama de montaje; b.- Voltaje U_2 ; c.- Voltaje U_d ; d.- corriente I_2 ; e.- corriente I_d .

Fig. 5.6 Rectificación del voltaje con el puente híbrido.

Fig. 5.7 Desfasamiento entre voltaje y corriente en el secundario del transformador; a.- Puente completamente tiristorizado; b.- Puente híbrido.

Fig. 5.8 Puente híbrido enseriado (2 niveles); a.- Diagrama de conexión; b.- Voltaje rectificado aplicado al motor.

Fig. 5.9 Variación del factor de potencia para puentes tiristorizados; a.- Puente híbrido enseriado (con cuatro niveles); b.- Puente híbrido sencillo; c.- Puente completamente tiristorizado.

Fig. 5.10 Variación del ángulo de encendido para mantener la fuerza de freno constante hasta el paro total.

Fig. 5.11 Variación del factor de potencia con la velocidad, para el régimen de freno recuperativo.

Fig. 6.1 Elementos de la catenaria; 1.- Hilo de Contacto; 2.- Cable mensajero; 3.- Colgador; 4.- Aislador; 5.- Sistema de ménsulas; 6.- Estructura soporte; 7.- Mensajero secundario; 8.- Sistema de puesta a tierra.

Fig. 6.2 Sección típica del hilo de contacto.

Fig. 6.3 Catenaria con apoyos a la misma altura.

Fig. 6.4 Catenaria con apoyos a alturas desiguales.

Fig. 6.5 Las fuerzas que actúan sobre la catenaria; a.- Sección transversal; b.- Diagramas de fuerzas.

Fig. 6.6 Variación de la Catenaria debido al fenómeno de dilatación térmica; a.- Estado a las condiciones 1; b.- estado a las condiciones 2.

Fig. 6.7 Anclaje compensador de tensión mecánica en la catenaria.

Fig. 6.8 El zig-zag del hilo de contacto.

Fig. 6.9 Separación de puntos de apoyo en curvas.

Fig. 6.10 Catenaria inclinada en curva.

Fig. 6.11 Catenaria compuesta.

Fig. 6.12 Esquema para cálculo de la reactancia inductiva; a.- vía sencilla; b.- vía doble.

Fig. 6.13 Diagrama para cálculo de la caída de voltaje.

Trenes eléctricos es el resultado de una larga investigación que contempla desde el punto de vista tecnológico uno de los medios de transporte de más tradición. Los cálculos en la tracción ferroviaria, problemas de la transformación de la energía eléctrica en fuerza motriz, circuitos, son sólo algunos de los aspectos teóricos. Por otra parte, el autor profundiza sobre preguntas prácticas relacionadas con la construcción de los diferentes sistemas ferroviarios utilizados en diversos países. Considerando la situación actual de los energéticos, se puede anticipar que la energía eléctrica y sus aplicaciones en el transporte, será de gran importancia para el transporte del futuro.

Trenes eléctricos propone una clasificación sumaria desde el punto de vista técnico-motriz, dejando las investigaciones acerca de las implicaciones urbanísticas o sociales en manos de otros especialistas. En esencia, este trabajo está enfocado hacia la especialidad de la ingeniería eléctrica.

NEAGU BRAHMA ERBAN es ingeniero electricista egresado del Instituto Politécnico de Bucarest-Rumania, con la especialidad en máquinas y aparatos eléctricos.

Ha trabajado tanto en la iniciativa privada como en dependencias estatales, colaborando y asesorando en el desarrollo de proyectos de instalaciones eléctricas. Ha participado en varios cursos de actualización profesional, así como en congresos y conferencias de la especialidad. Desde 1979 es profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

0022002 01912



30.00 - \$ 30.00



UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

UNIDAD AZCAPOTZALCO Coordinación de Extensión Universitaria

Sección Editorial